

本資料のうち、枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0620-2_改5
提出年月日	2021年8月30日

補足-620-2 埋め込まれた建屋の表層地盤による影響について

## 目 次

1.	概要	1
2.	J E A G の取り扱い及び建屋表層地盤の特徴	4
2.1	「J E A G 4 6 0 1 -1987」による表層地盤の扱い	4
2.2	表層地盤の特徴	6
3.	表層地盤の影響に関する設計方針	8
4.	今回工認における表層地盤による影響の解析モデルへの反映（原子炉建屋）	9
4.1	3.11地震における傾向	9
4.1.1	入力地震動評価に関する表層地盤の影響の検討	9
4.1.2	自由地盤における表層地盤の非線形化の傾向について	15
4.2	既工認における表層地盤の扱い	16
4.3	入力地震動に関する検討	18
4.3.1	基準地震動 $S_s$ に対する入力地震動評価用地盤モデルの設定概要	18
4.3.2	観測記録を用いた入力地震動評価用地盤モデルの検証	48
4.3.3	基準地震動 $S_s$ に対する入力地震動評価用地盤モデルの適用性	60
4.3.4	表層地盤の影響を考慮した入力地震動評価が建屋応答へ与える影響 （原子炉建屋）	73
4.4	埋込み効果（側面地盤ばね）に関する検討	81
5.	設計への反映	114
5.1	設定した入力地震動評価用地盤モデルの概要	114
5.2	建屋の表層地盤による影響を考慮する建屋	118
5.2.1	既設建屋	118
5.2.2	新設建屋	124
6.	まとめ	125

- 別紙 1 3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析による  
表層地盤の影響確認（原子炉建屋）
- 別紙 2 自由地盤のはざとり解析用地下構造モデルによる傾向について
- 別紙 3 原子炉建屋の炉心ボーリングの PS 検層及び密度検層結果
- 別紙 4 表層地盤の層境界の設定について
- 別紙 5 敷地における一次元波動論の適用性について
- 別紙 6 表層地盤の層境界に関する検討
- 別紙 7 表層地盤下部の地盤物性の検討
- 別紙 8 線形地盤モデルを用いた表層地盤の非線形化による影響確認
- 別紙 9 表層地盤上部（O. P. 14. 8m～O. P. 0m）の地盤物性値の設定
- 別紙 10 観測記録を用いた地盤モデルの検証
- 別紙 11 逐次非線形モデルと等価線形モデルによる比較
- 別紙 12 入力地震動評価用地盤モデルの下端深さに関する検討
- 別紙 13 地盤の減衰の設定について
- 別紙 14 表層地盤物性値の違いによる建屋応答への影響について
- 別紙 15 表層地盤による埋込み効果の影響
- 別紙 16 側面地盤ばねの有無が建屋応答に与える影響
- 別紙 17 表層地盤の影響を考慮した入力地震動評価が建屋応答へ与える影響
- 別紙 18 シミュレーション解析による表層地盤の影響確認  
（タービン建屋，第 3 号機海水熱交換器建屋）

- 付録 1 地震計配置図
- 付録 2 今回工認に係る建屋と地盤との接地状況
- 付録 3 逐次非線形解析の概要
- 付録 4 入力地震動評価における補正水平力について
- 付録 5 Novak ばねの概要について

 本日の説明範囲

## 1. 概要

本資料は添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」の記載内容を補足するものであり、既工認から変更した表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定等について説明するものである。なお、他の建物・構築物の地震応答計算書の記載内容を共通的に補足する内容についても、本資料で代表し説明する。

女川原子力発電所第2号機の各建屋の既工認においては、深く埋め込まれている建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果（側面地盤ばね）は考慮しない地震応答解析モデルを採用していた。これは、硬質岩盤では「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」による側面地盤ばね（Novak ばね）の評価に課題があることを踏まえ、保守的な評価としていたものである。

建設にあたっては、埋込み効果を考慮しないことから、建屋周囲の埋戻しは掘削土等を使用しており、特に拘束効果は期待できない状況となっている。

今回工認では、原子炉建屋の地震応答解析モデルについて、「J E A G 4 6 0 1-1987」による手法に基づき、解放基盤表面で定義される基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  を基に地盤条件を適切に考慮したうえで、地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定することに見直した。一方、埋込み効果については既工認と同じく、その効果を無視することとした。

女川原子力発電所では平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下「3.11地震」という。）や、またその余震である2011年4月7日宮城県沖の地震（以下「4.7地震」という。）等の観測記録が複数の建屋で得られており、記録を用いた検討から、以下の傾向を確認している。

- ① 3.11地震等の記録を用いた原子炉建屋等のシミュレーション解析では、表層地盤の影響を考慮した入力地震動を用いるケース（E+F入力）の方が、解放基盤相当の観測記録（自由地盤のはぎとり波）を直接入力するケース（2E入力）に比べ、より観測記録との整合性が良く、表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された。
- ② 一方、埋込み効果については、原子炉建屋のシミュレーション解析では埋込み効果を考慮しないモデルが観測記録と調和的であった。また、建屋全体が埋め込まれている第3号機海水熱交換器建屋では側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮した解析結果は観測記録よりも過大な結果を与えるが、観測記録からは埋込み効果による建屋の応答低減傾向が確認された。

地盤モデルの物性値は、地盤調査結果、建設時の掘削状況及び地震観測記録の分析により設定し、建屋シミュレーション解析で妥当性を確認している。表1-1に埋め込まれた建屋の表層地盤の扱いに関する既工認からの変更点を示す。また、検討全体のフローを図1-1に示す。

ここでは、既工認から変更した表層地盤の影響を考慮した入力地震動の評価及び入力地震動評価用地盤モデルの設定の妥当性、また、埋込み効果の影響について検討する。

表 1-1 埋め込まれた建屋の表層地盤の扱いに関する既工認からの変更点

	既工認	今回工認	変更の適用性	他サイト既工認実績	変更による効果
側面地盤ばねの扱い	非考慮	非考慮	変更無し	女川の今回工認と同じく側面地盤ばねは「非考慮」, 入力地震動算定時の表層地盤の影響は「考慮」のケース有り	大 (応答低減効果)
入力地震動算定時の表層地盤の影響考慮	非考慮 (2E 入力)	考慮 (E+F 入力)	地震観測記録の傾向を反映		
入力地震動の算定方法	—	表層地盤上部の非線形性を考慮した一次元地盤応答解析モデル (逐次非線形解析)	地震観測記録で妥当性を検証	無  (他サイトは 2 次元 FEM モデル (等価線形解析))	小



## 表層地盤が建屋の応答に与える影響を考慮した地震応答解析モデルの策定概要

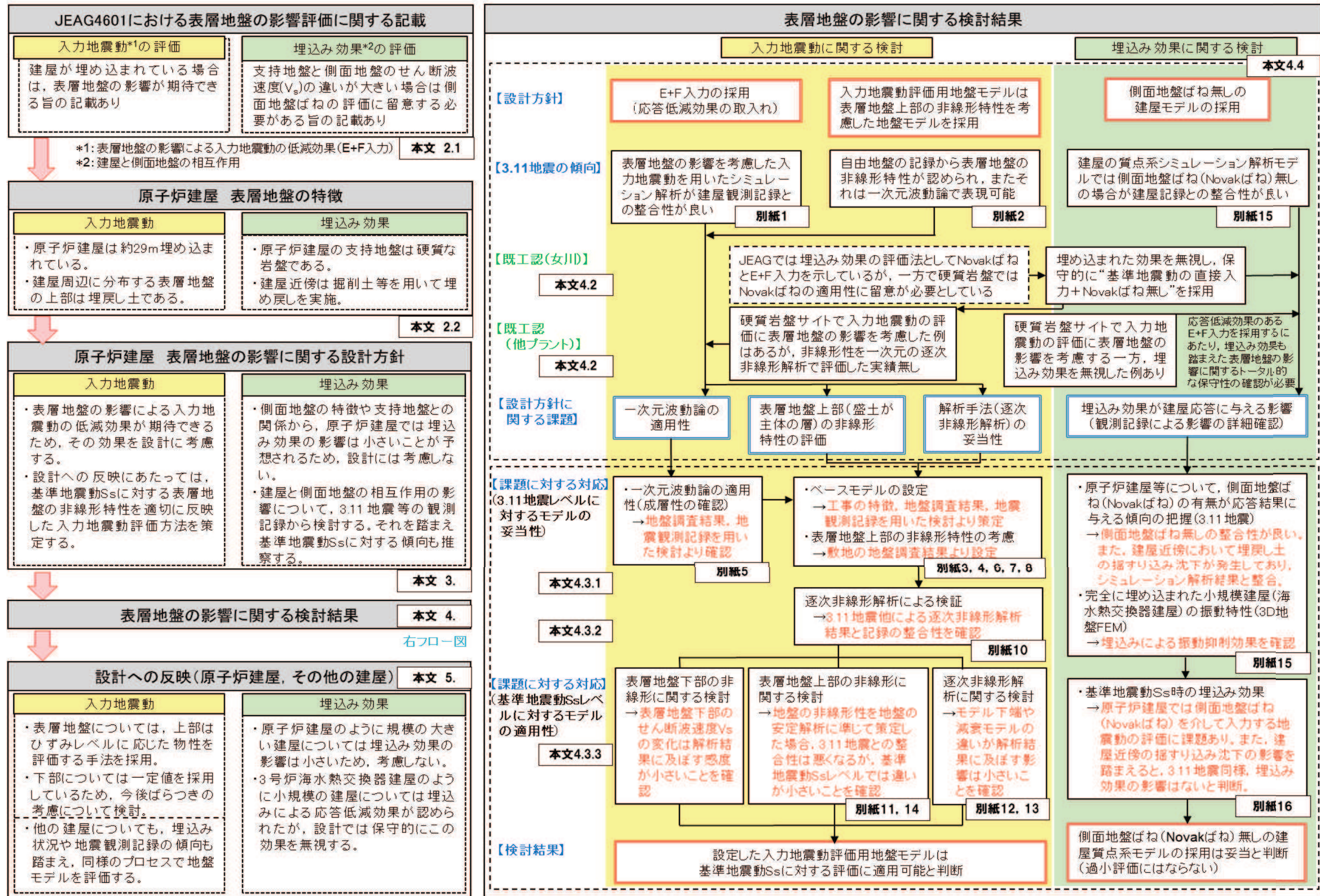


図 1-1 検討の全体フロー



2. J E A G の取り扱い及び建屋表層地盤の特徴

2.1 「J E A G 4 6 0 1 -1987」による表層地盤の扱い

(1) 表層地盤の影響を考慮する場合の入力地震動の評価

「J E A G 4 6 0 1 -1987」では、表層地盤の影響が無視できる場合には基準地震動がそのまま入力地震動として用いられるが、表層地盤の影響を考慮する場合には、基礎マット底面における地震動を算定して用いる、としている。

【「J E A G 4 6 0 1 -1987」の記載抜粋（下線加筆）】

第5章 建物・構築物の耐震設計

5.2 地震応答解析 / 5.2.4 線形地震応答解析

(2) 設計用入力地震動

(略)・・・対象とする建屋が解放基盤表面に設置され、表層地盤の影響が無視できる場合には基準地震動がそのまま入力地震動として用いられるが、表層地盤の影響を考慮する場合や解放基盤表面が建屋の基礎マット底面より深い場合には、上記の基準地震動より基礎マット底面及び解析モデル底面における地震動を算定して用いる。・・・(略)

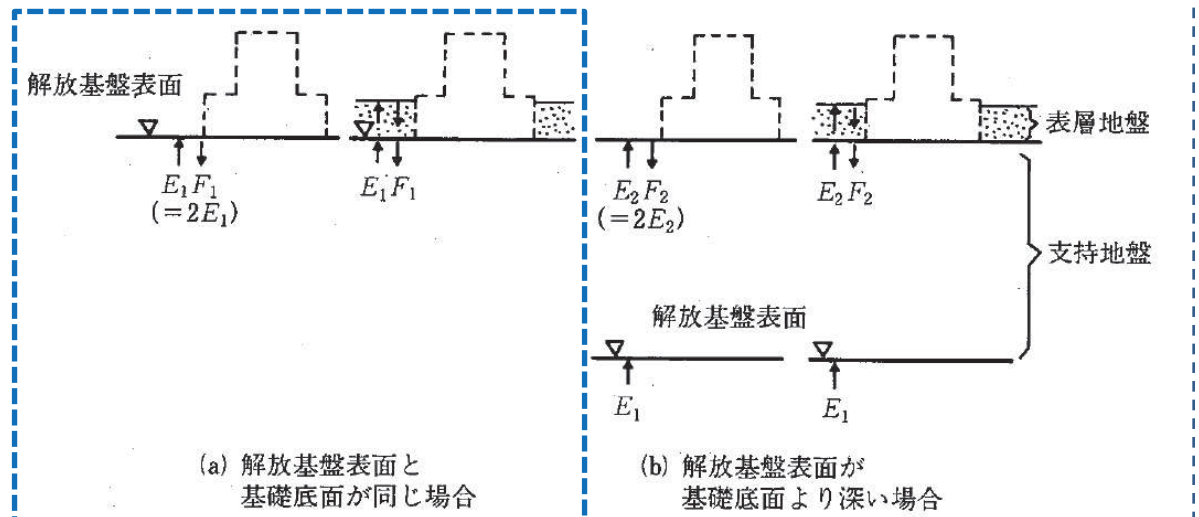


図 5.2.4-2 SR モデルの入力地震動の算定

(2) 支持地盤が硬質岩盤の場合の建屋埋込み効果の評価にあたっての課題

「J E A G 4 6 0 1 -1991追補版」では、建屋埋込み効果の評価にあたっては、埋戻し土等が材料非線形になると想定される場合には、その歪みに対応するせん断弾性係数等の採用を求めている。

特に、支持地盤と埋戻し土のせん断波速度の違いが大きく、表層地盤の卓越振動数が顕著に励起される場合は、側面地盤ばねの評価に留意する必要があるとされている。

【「J E A G 4 6 0 1 -1991追補版」の記載抜粋（下線加筆）】

3. 建屋埋込み効果の評価法 / 3.2.5 留意事項

- (1) 地震応答解析に用いる土質定数は、土質試験の結果に基づいた値を採用する。  
埋戻し土等が材料非線形になると想定される場合には、その歪みに対応するせん断弾性係数Gと減衰定数hを土質定数として採用することができる。

3.3 解説 / 3.3.1 スウェイ・ロッキングモデル

(5) 本モデルの適用上の留意点

ここで述べたスウェイ・ロッキングモデルは、実用性を考慮して各々独立な建屋底面地盤ばねと地下部外壁地盤ばねによってモデル化した簡便な解析モデルである。地下部外壁地盤ばねの評価には、平面的に切り出した二次元弾性地盤の地盤ばねを近似的に採用しているため、地下部外壁地盤ばねには地盤の深さ方向の振動特性が考慮されていない。地下部外壁に接する地盤（表層地盤）のS波速度に比べ支持岩盤のそれが著しく大きな地盤系の場合には、表層地盤の卓越振動数が顕著に励起されるが、この卓越振動数の影響は地盤ばねに反映されない。このようなことから、この種の地盤系に埋め込まれた原子炉建屋の地震応答解析をここで述べたスウェイ・ロッキングモデルで行うと他の解析法との差異が生ずることもあり、留意する必要がある。



## 2.2 表層地盤の特徴

原子炉建屋の当初設計では、側面地盤による埋込み効果を期待していないため、女川原子力発電所第2号機の建設に当たっては広くオープン掘削が行われ、また、埋戻し工事は掘削土を利用している。従って、原子炉建屋のように重量の大きい建屋については、特に埋め戻し土が建屋の振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

今回工認における既設建屋の表層地盤との接地状況を整理して表2-1に、女川原子力発電所第2号機建設時の地盤の掘削状況を図2-1に、原子炉建屋近傍の埋戻し土の状況を図2-2に示す。

表2-1 今回工認における既設建屋の表層地盤との接地状況

建屋	埋込み深さ (基礎版底面 レベル)	表層地盤と の接地状況	(参考) 建屋に要求される機能 (第2号機用)
原子炉建屋	約 29m (O.P. -14.1m)	3面接地	Sクラス (原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約 16m (O.P. -1.5m)	1~2面接地	Sクラス (中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約 17m (O.P. -2.2m)	2~3面接地	Bクラス (補助しゃへい壁) Bクラス設備 (S d機能維持設備 含む) の間接支持機能 原子炉建屋, 制御建屋へ波及的影 響を与えないこと
補助ボイラー建屋	約 7m (O.P. +8.0m)	2面接地	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えな いこと
第3号機 海水熱交換器建屋	約 27m (O.P. -12.5m)	4面接地	浸水防護施設の間接支持機能
第1号機 制御建屋	約 15m (O.P. 0m)	2面接地	制御建屋へ波及的影響を与えな いこと

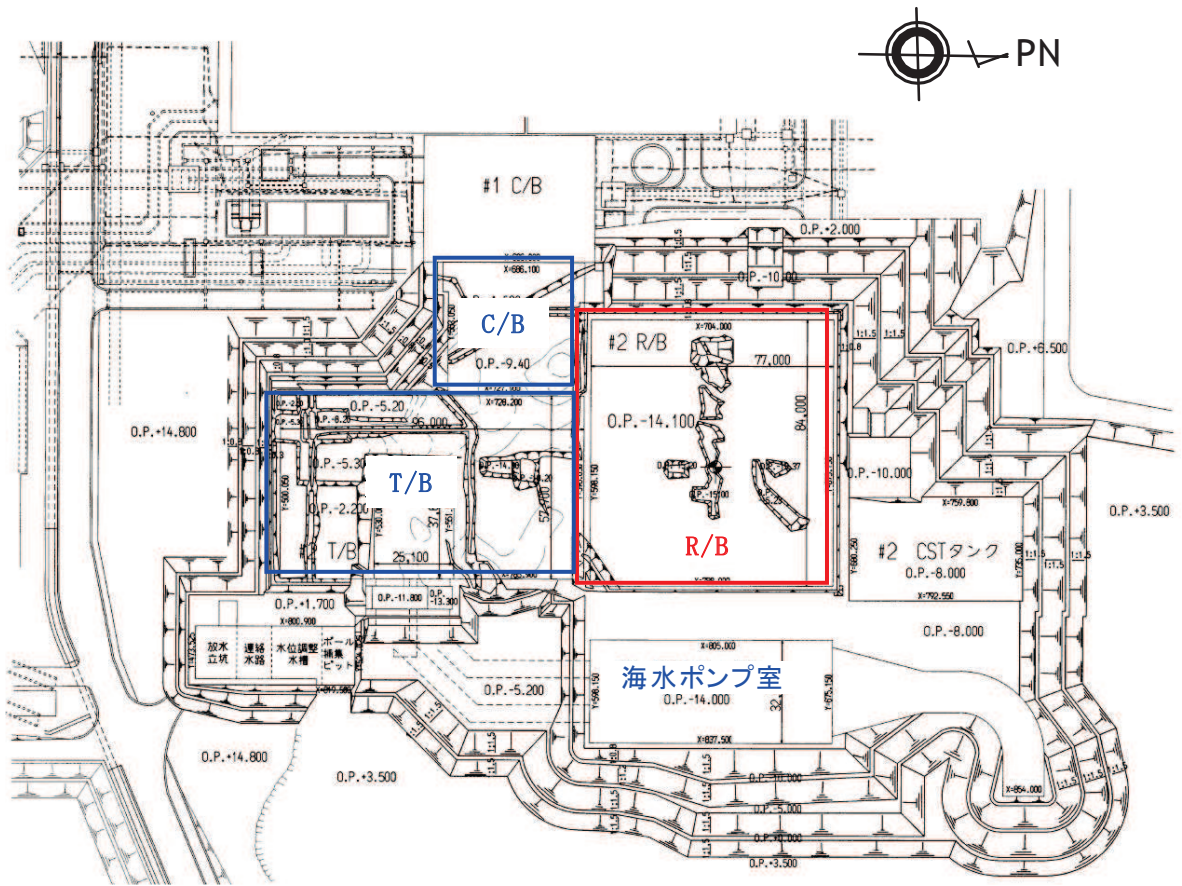


図 2-1 女川原子力発電所第 2 号機建設時の地盤の掘削状況

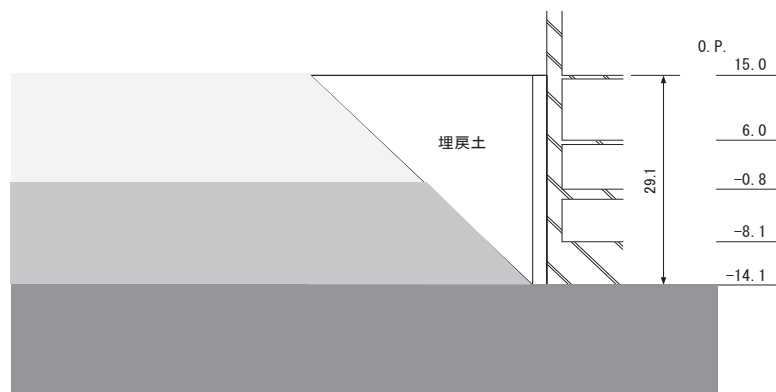


図 2-2 原子炉建屋近傍の埋戻し土

### 3. 表層地盤の影響に関する設計方針

#### (1) 入力地震動の評価方針

- ① 表層地盤の影響により入力地震動の低減効果が期待できるため、その効果を設計に考慮する。
- ② 設計への反映にあたっては、基準地震動  $S_s$  に対する表層地盤の非線形特性を適切に反映した入力地震動評価方法を策定する。

#### (2) 埋込み効果の評価方針

- ① 側面地盤の特徴や支持地盤との関係から、原子炉建屋では埋込み効果の影響は小さいことが予想されるため、設計には考慮しない。
- ② 建屋と側面地盤の相互作用の影響について、3.11地震等の観測記録から検討し、それを踏まえて基準地震動  $S_s$  に対する傾向も推察する。

#### 4. 今回工認における表層地盤による影響の解析モデルへの反映（原子炉建屋）

##### 4.1 3.11 地震における傾向

##### 4.1.1 入力地震動評価に関する表層地盤の影響の検討（詳細は別紙1参照）

###### (1) 検討概要

既工認の入力地震動は、表層地盤の影響を考慮せず、保守的に基準地震動を直接入力する手法（2E 入力）を採用していた。本検討では、3.11 地震に対し、

① 既工認と同じく解放基盤表面相当における地震観測記録（はぎとり波）を建屋に直接入力する解析

② 今回工認で採用を予定している解析、すなわちはぎとり波から建屋表層の表層地盤の影響を考慮して入力地震動（E+F+P 波、P は補正水平力の時刻歴波形）を算定し、これを入力する（E+F 入力）解析

を行い、解析結果と観測記録の比較を行うことで、表層地盤が入力地震動に与える影響の有無について確認した。入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討の概念図を図 4-1 に示す。

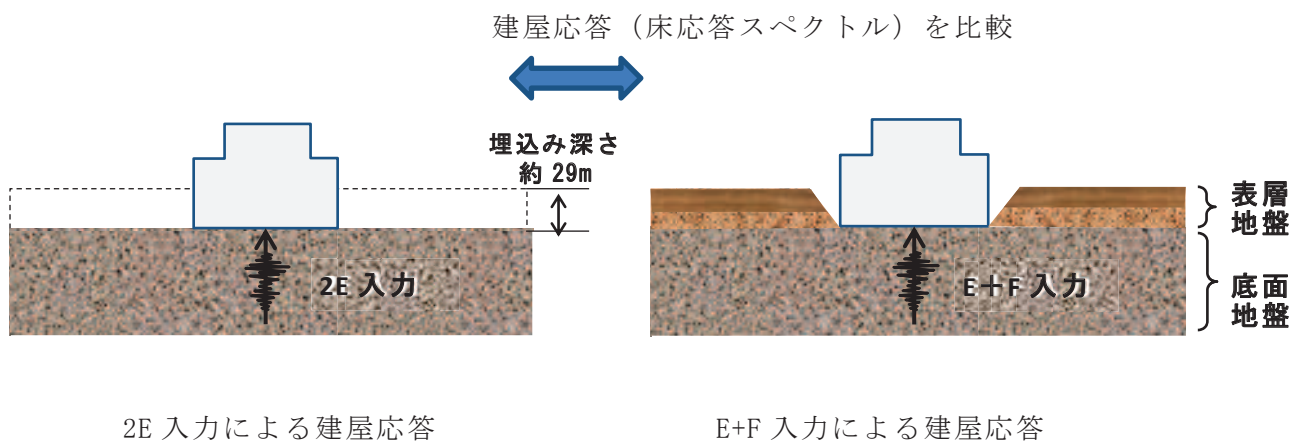


図 4-1 入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討の概念図



(2) 検討方法

3.11 地震のはぎとり波は自由地盤で観測された岩盤上部の地中記録から表層地盤からの反射の影響を解析的に除去した地震動を用いた。はぎとり波の算定にあたっては、自由地盤の岩盤中観測点（3点）に加え、表層地盤における観測点それぞれの記録の伝達関数と整合する地盤モデルを策定した上で、はぎとり波を算定した（詳細は別紙2参照）。

建屋の入力側の地盤モデルは、地盤調査結果に基づき設定した地盤モデル（表層地盤非線形考慮）とする（地盤調査結果については別紙3参照）。

入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討における解析条件を表4-1に、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を表4-2に示す。

また、地震応答解析モデルは、基礎版上で得られた観測記録を用いたシミュレーション解析で観測記録との整合を確認したモデル（以下、「3.11 地震シミュレーションモデル」という。）を採用しており、3.11 地震による建屋の初期剛性低下や建屋減衰7%を用いている（図4-2参照）。

表4-1 入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討における解析条件  
(3.11 地震のはぎとり波を用いた2E入力とE+F入力の比較 [原子炉建屋])

ケース	2E 入力したケース	E+F 入力したケース
建屋	原子炉建屋	
地震動	3.11 地震のはぎとり波	
入力地震動	直接入力（2E 入力）	基礎版底面レベルの地震動を算定し入力（E+F 入力，補正水平力考慮）
建屋モデル	3.11 地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮，建屋減衰7%，側面地盤ばね無し)	
地盤モデル	—	地盤調査結果に基づき設定した地盤モデル (表層地盤非線形考慮)

表 4-2 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

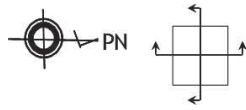
	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数* <sup>2</sup> h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3* <sup>3</sup>
	0.00	23.3	900* <sup>4</sup>	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

注記\*1：O. P. 14.8m～O. P. 0m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断剛性G<sub>0</sub>を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

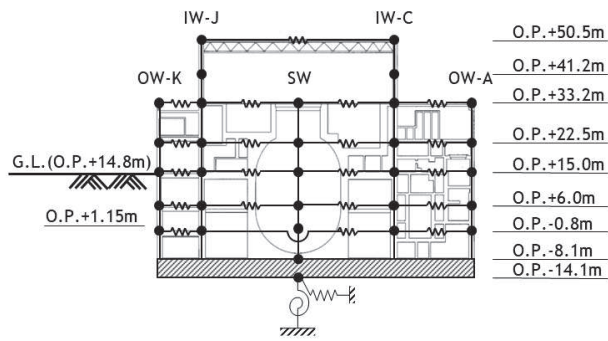
\*2：レーリー減衰

\*3：ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

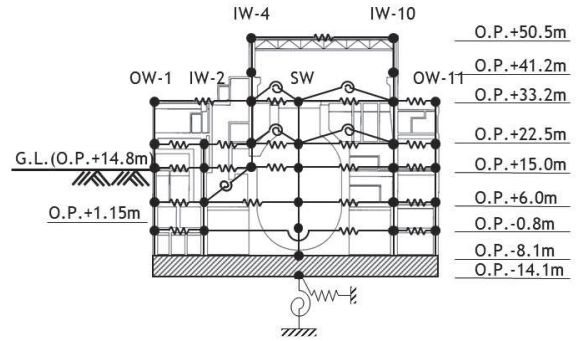
\*4：PS 検層結果と観測記録の分析より設定



コンクリートの物性値(設計値)  
 設計基準強度 : 32.4N/mm<sup>2</sup> (330kgf/cm<sup>2</sup>)  
 ヤング係数 : 2.65 × 10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup> (2.70 × 10<sup>6</sup>tf/m<sup>2</sup>)  
 せん断弾性係数: 1.14 × 10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup> (1.16 × 10<sup>6</sup>tf/m<sup>2</sup>)



NS方向



EW方向

建屋	地震	方向	コンクリート壁剛性の設計値に対する補正係数 (観測記録と整合する等価な剛性)		減衰
			3階・クレーン階	地下3階～2階	
原子炉 建屋	3.11 地震	NS	0.3	0.75	0.07
		EW	0.5	0.80	0.07
	4.7 地震	NS	0.3	0.75	0.07
		EW	0.5	0.80	0.07

図4-2 3.11地震シミュレーションモデル

(基礎版上で得られた観測記録を用いたシミュレーション解析で  
 観測記録との整合を確認したモデル)

(3) 検討結果

3.11 地震のはざとり波を用いた直接入力（2E 入力）と，表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力（E+F 入力）によるシミュレーション解析結果の比較を図 4-3 に示す。各階の床応答スペクトルは，2E 入力するよりも E+F 入力する方が観測記録との整合性が良い。従って，入力地震動に対する表層地盤の影響が確認された。



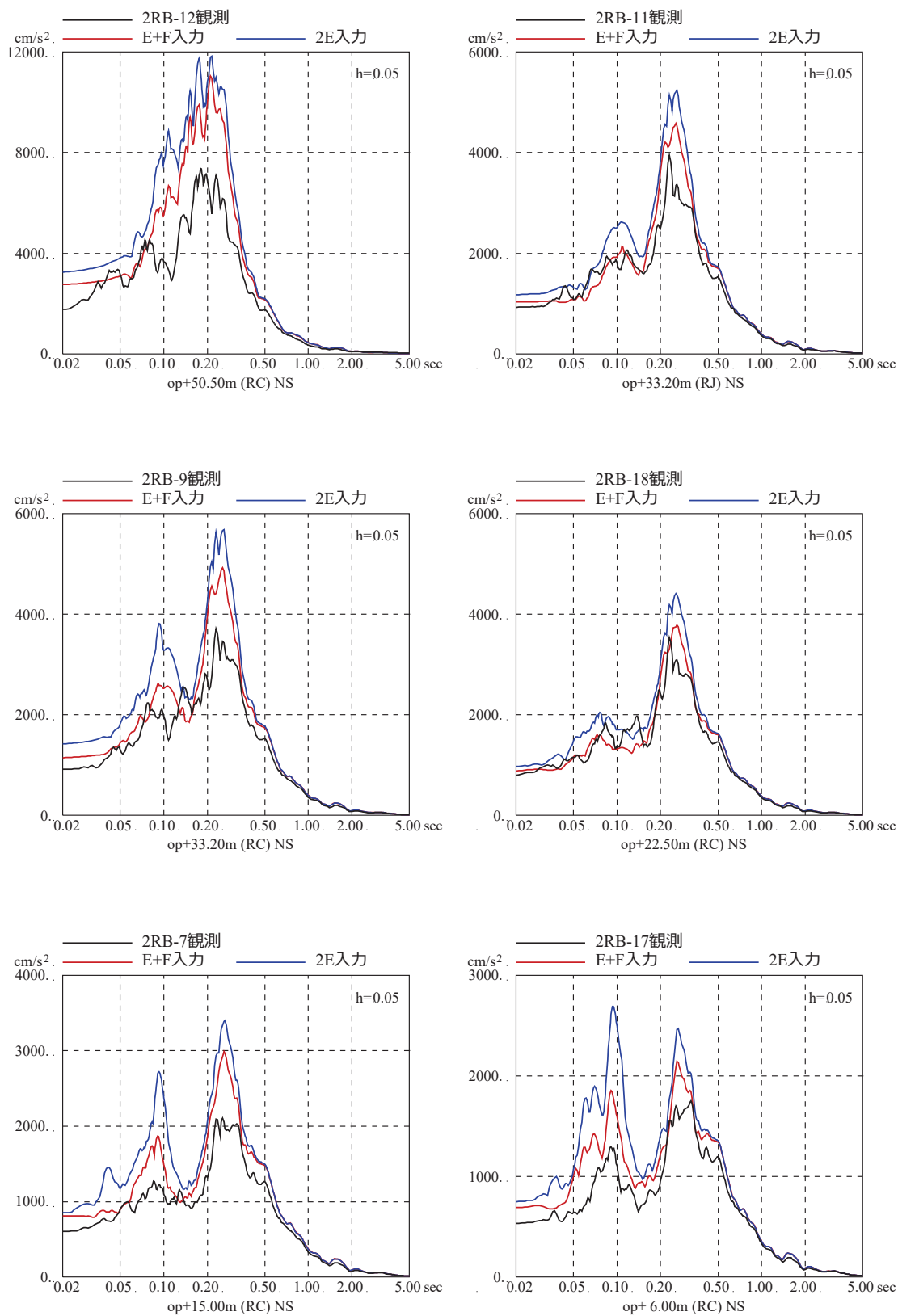


図 4-3 3.11 地震のはぎとり波を用いた 2E 入力と E+F 入力による  
シミュレーション解析結果の比較  
(原子炉建屋, NS 方向)

注：地震計位置は、付録 1 参照

4.1.2 自由地盤における表層地盤の非線形化の傾向について（詳細は別紙2参照）

女川原子力発電所の自由地盤観測点では岩盤中3か所、表層地盤1か所の計4か所に地震計を設置しており、はぎとり解析用地下構造モデル（最適化地盤モデル）は、過去の中小地震の観測記録を用いて、これら4か所の記録の伝達関数から同定している。

最適化地盤モデルの理論伝達関数と3.11地震の観測記録の伝達関数の比較を図4-4に示す。

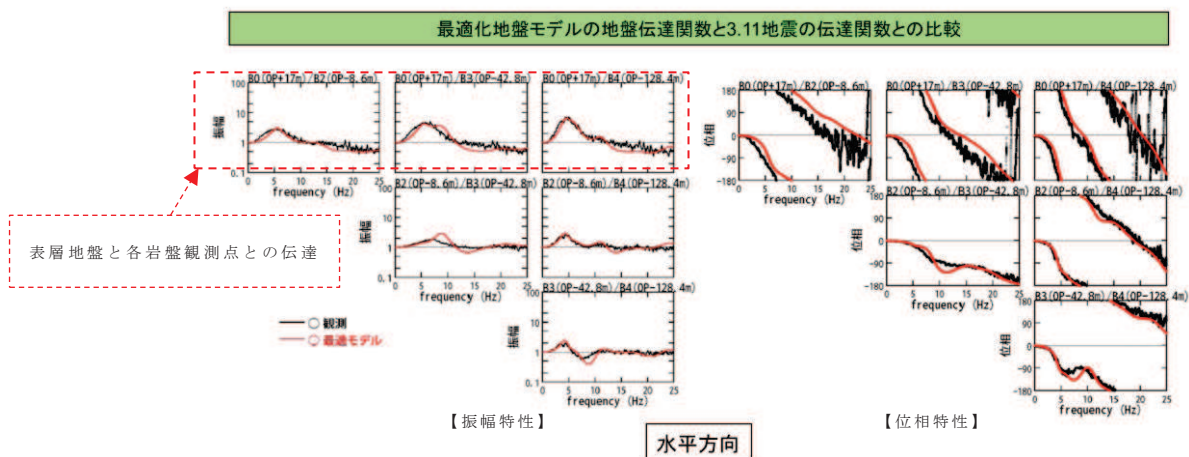
3.11地震の観測記録では、表層地盤と各岩盤観測点との伝達関数が長周期化しており、最適化地盤モデルの再設定を行ったが、モデルは中小地震の記録を用いて設定した解析用地下構造モデルをベースに、最表層地盤の地盤物性値のみを最適化することで表層地盤も含めた観測記録の再現性が図られた。

このことから、岩盤と表層地盤の波動伝播特性については表層地盤の非線形化を適切に評価することで評価可能であることを確認した。

87

### 3.2 水平動のはぎとり解析用地下構造モデル(最適化地盤モデル) (5)

#### 最適化地盤モデルの理論伝達関数と2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録の伝達関数 地盤モデルの最適化の検討



最適化地盤モデルの地盤伝達関数と3.11地震の地盤伝達関数との比較

※原子力安全・保安院 地震・津波6-4-2より抜粋



「第128回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 資料 2-2 女川原子力発電所敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について（補足説明資料）」より抜粋・加筆

図4-4 はぎとり解析用の最適化地盤モデルと3.11地震の伝達関数の比較

#### 4.2 既工認における表層地盤の扱い

女川原子力発電所第2号機の各建屋の既工認においては、深く埋め込まれている建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果（側面地盤ばね）は考慮しない地震応答解析モデルを採用していた。これは、硬質岩盤では「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」による側面地盤ばね（Novakばね）の評価に課題があることを踏まえ、保守的な評価としていたものである。

図4-5に既工認における表層地盤の扱いを、図4-6に表層地盤の影響を考慮した地震応答解析モデルを、図4-7に解析結果の比較（最大応答加速度）を示す。

なお、実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施した。

また、表層地盤の扱いに関する他サイトにおける既工認実績としては、女川の今回工認と同じく側面地盤ばねは「非考慮」、入力地震動評価時の表層地盤の影響は「考慮」のケースがある。入力地震動の評価方法に関しては、他サイトでは2次元FEMモデル（等価線形解析）の実績はあるが、表層地盤上部の非線形性を考慮した一次元地盤応答解析モデル（逐次非線形解析）の実績はない。

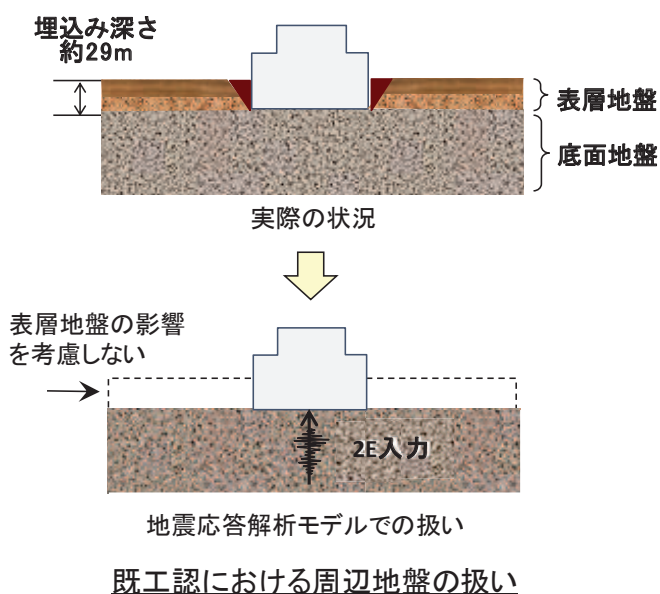


図4-5 既工認における表層地盤の扱い

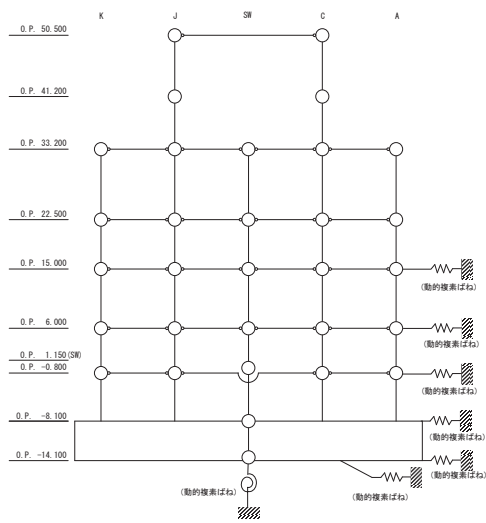


図4-6 表層地盤の影響を考慮した地震応答解析モデル

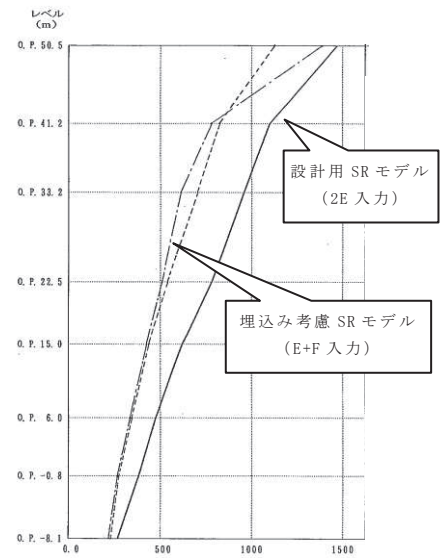


図4-7 解析結果の比較 (最大応答加速度)



## 4.3 入力地震動に関する検討

### 4.3.1 基準地震動 $S_s$ に対する入力地震動評価用地盤モデルの設定概要

#### (1) 地盤モデル設定の流れ

「4.1 3.11 地震等における傾向」での 3.11 地震における表層地盤が入力地震動に与える影響の検討結果から、表層地盤の非線形性を適切に考慮することで岩盤と表層地盤の波動伝播特性を考慮した入力地震動の評価が可能と考えられる。

ここでは、図 4-8 に示す基準地震動  $S_s$  の地震応答解析に用いる入力地震動評価用地盤モデルの設定フローに従い、地震動の振幅に応じた非線形特性を考慮した地盤モデルを設定する。

設定の基本的考え方は以下のとおり。

#### ① 地盤モデルの仮設定

- ・建設時の掘削状況や岩盤レベルの傾向も踏まえ 2 層地盤（表層地盤下部及び表層地盤上部）を設定
- ・パラメータスタディの初期値としての層境界位置や各地盤の物性値については、過去の調査結果等から設定

#### ② 仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討

（線形モデルでの検討）

- ・以下のパラメータスタディにより、表層地盤の層境界、表層地盤の  $V_s$  について検討する。
  - a. 層境界のパラメータスタディ（O.P. -2.0m～O.P. 2.0m）
  - b. 表層地盤下部のパラメータスタディ（ $V_s=800\sim 1000\text{m/s}$ ）
  - c. 表層地盤上部のパラメータスタディ（ $V_s=300\sim 600\text{m/s}$ ）

#### ③ ベースモデルの決定

- ・O.P. 0m に層区分を持つ 2 層地盤を設定
- ・表層地盤下部の地盤物性を 900m/s に設定
- ・表層地盤上部に非線形性を考慮

#### ④ 入力地震動評価用地盤モデルの設定

（表層地盤上部の非線形性を考慮した地盤モデル）

- ・2 層の表層地盤の内、表層地盤上部については、非線形化の影響が大きいと考えられること、また、自由地盤のはぎとり解析においては表層地盤部のみの非線形性を考慮することにより表層地盤で得られた観測記録の傾向が再現できたこと、パラメータスタディにより上層部の  $V_s$  を変えることで適切な伝達特性を概ね評価できることから、非線形特性は地盤調査結果に基づき設定する。

以上の検討によって策定した入力地震動評価用地盤モデルに対し、様々な地震動の振幅レベルの地震観測記録を用いて適合性を検証する。

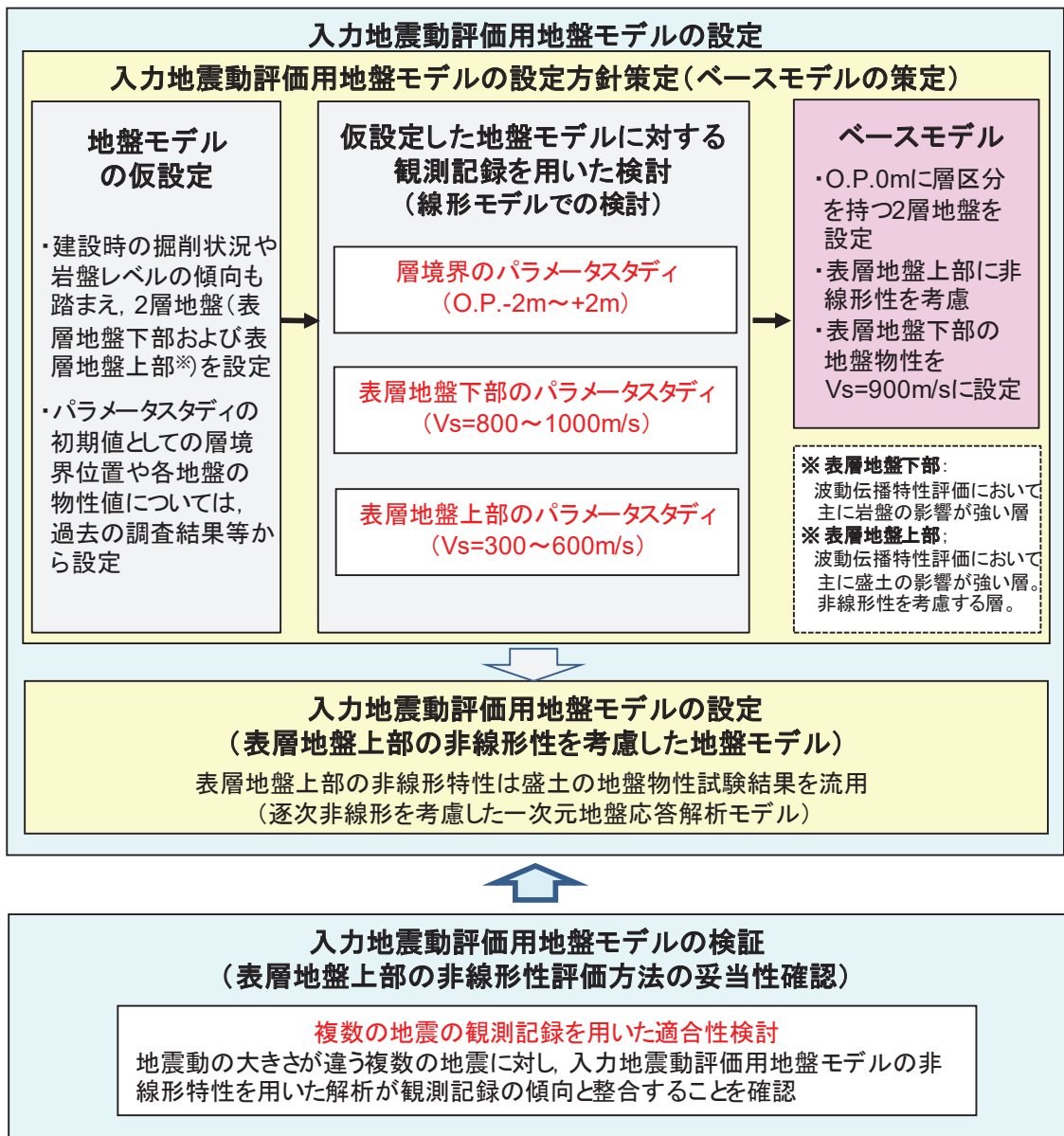


図 4-8 基準地震動 S s の地震応答解析に用いる地盤モデル設定フロー

(2) 地盤モデルの仮設定

a. 表層地盤の層境界の仮設定（詳細は別紙 4 参照）

女川原子力発電所第 2 号機建設時の地盤の掘削状況に基づき、一次元地盤モデルの表層地盤下部と上部の境界面の深さを設定する。（一次元波動論の適用性については別紙 5 参照）

図 4-9 に女川原子力発電所第 2 号機建設時の地盤の掘削状況（平面図）を、図 4-10 に岩盤分類図（東西断面）を示す。女川原子力発電所第 2 号機建設時の地盤の掘削状況から、原子炉建屋周囲の地盤の大部分は 0.P.0m まで表層地盤の掘削が行われており、竣工後は現在の G.L. 面である 0.P.14.8m まで埋め戻されている。

0.P.0m より浅部地盤の建屋周辺状況は、北と東西が地質調査時とほぼ同じ状況で埋戻し土が分布している。一方、南は硬い岩盤となっている。

以上のことから、表層地盤については、波動伝播特性において主に岩盤の影響が支配的な「表層地盤下部」と、主に盛土の影響が支配的な「表層地盤上部」（非線形性を考慮する層）の 2 層に分割し、その層境界は、建設時の掘削状況及び地質調査時の PS 検層範囲と対応する 0.P.0m に仮設定する。

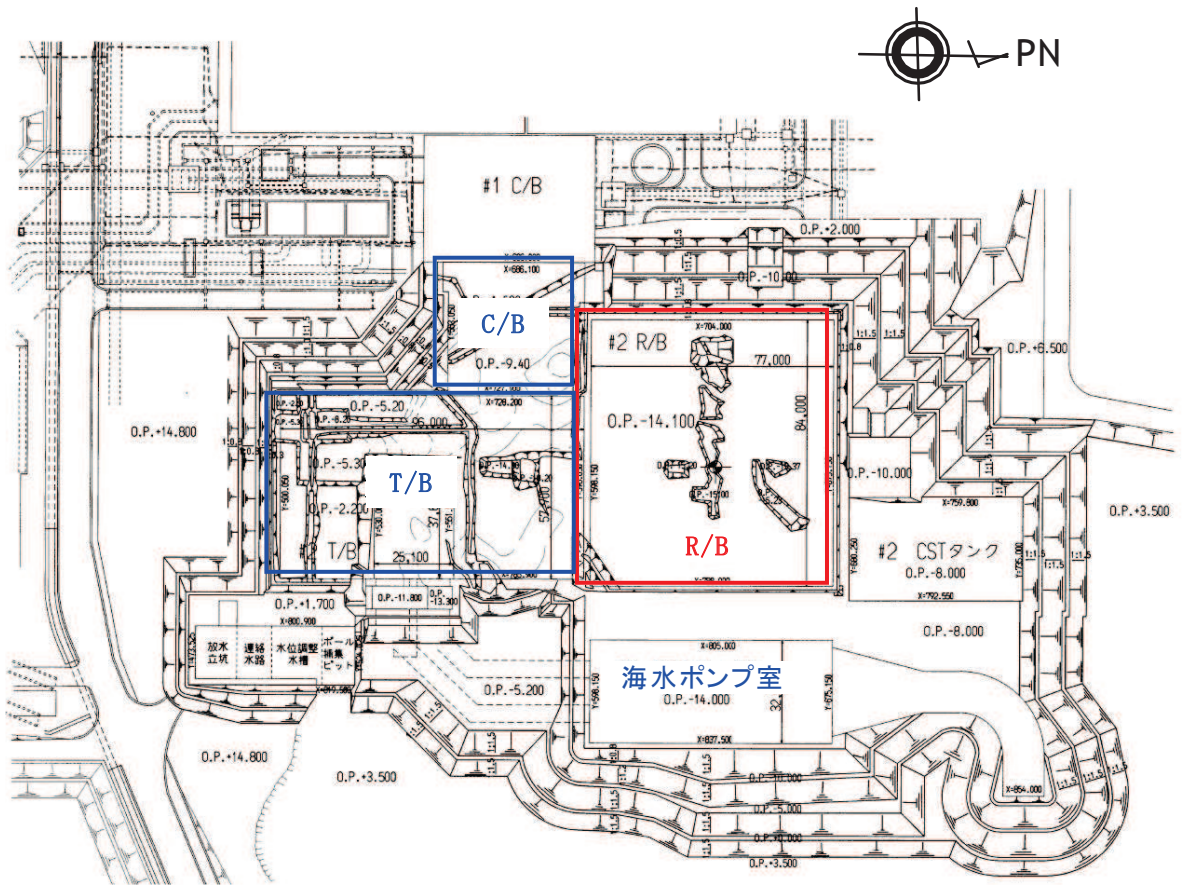


図 4-9 女川原子力発電所第 2 号機建設時の地盤の掘削状況（平面図）

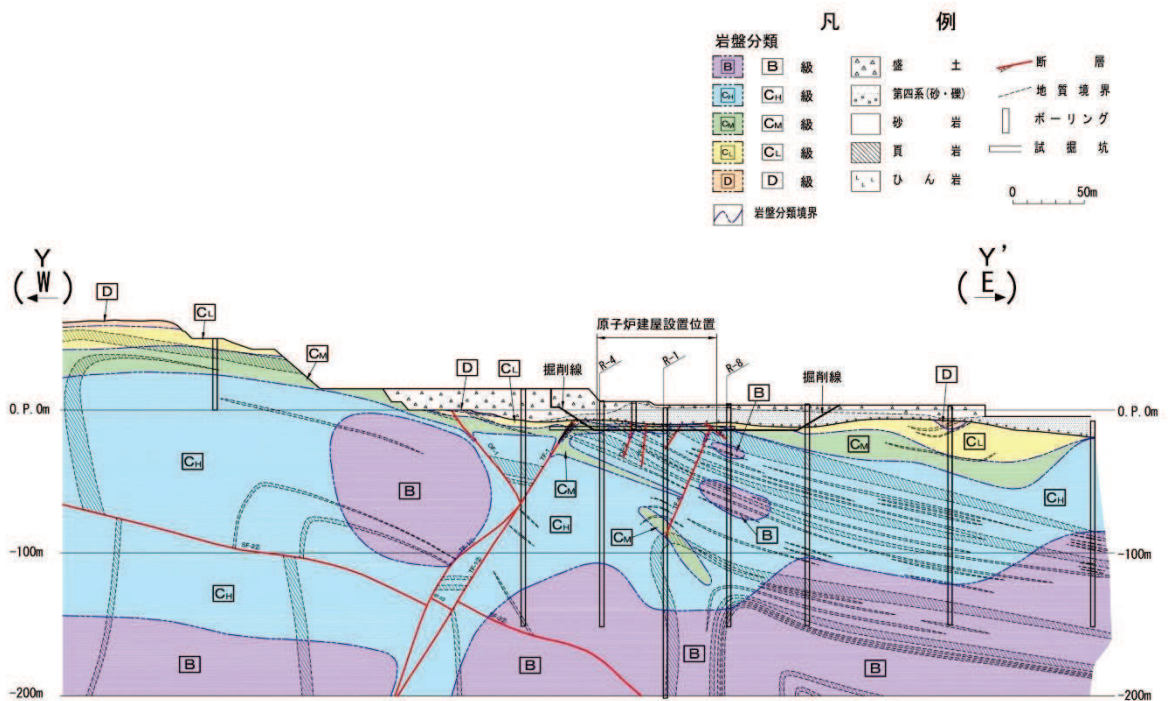


図 4-10 岩盤分類図（東西断面）



b. 表層地盤下部（O.P. 0m～O.P. -14.1m）の地盤物性の仮設定

PS 検層結果では，O.P. 0m～O.P. -14.1m 付近までの表層地盤のせん断波速度  $V_s$  はおよそ 500～1000m/s に分布していること，3.11 地震の観測記録の分析，自由地盤のはぎとり地盤モデルでは 1000m/s 程度であったことから，せん断波速度  $V_s$  を表層地盤の PS 検層結果の上限値に近い 900m/s 程度に仮設定する。原子炉建屋位置の PS 検層結果を図 4-11 に，3.11 地震時の最適化地盤モデルを表 4-3 に示す。

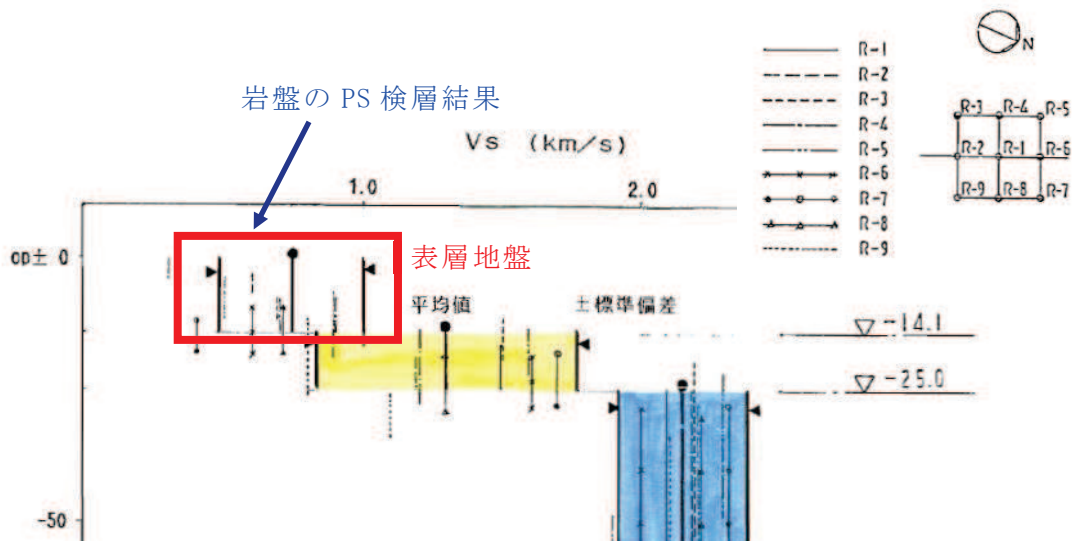


図 4-11 原子炉建屋位置の PS 検層結果

表 4-3 3.11 地震時の最適化地盤モデル

深さ		層厚 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	減衰定数h(f)	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					$h_0$	$\alpha$
0	18.7					
-1.7	17.0	1.7	2.10	112	0.44	0.38
-5.0	13.7	3.3	2.10	112	0.44	0.38
-21.6	-2.9	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-27.3	-8.6	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-147.1	-128.4	65.3	2.68	2600	0.77	1.00

解放基盤  
表面相当

c. 表層地盤上部（O.P. 14.8m～O.P. 0m）の地盤物性の仮設定

3.11 地震及び 4.7 地震のはぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動（E+F+P 波）の伝達関数の比較では、表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を 900m/s, 表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  を 350m/s とした場合に観測記録との整合性が良いことから、表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  を 350m/s 程度に仮設定する。伝達関数の比較の概念図を図 4-12 に、伝達関数の比較を図 4-13 及び図 4-14 に示す。

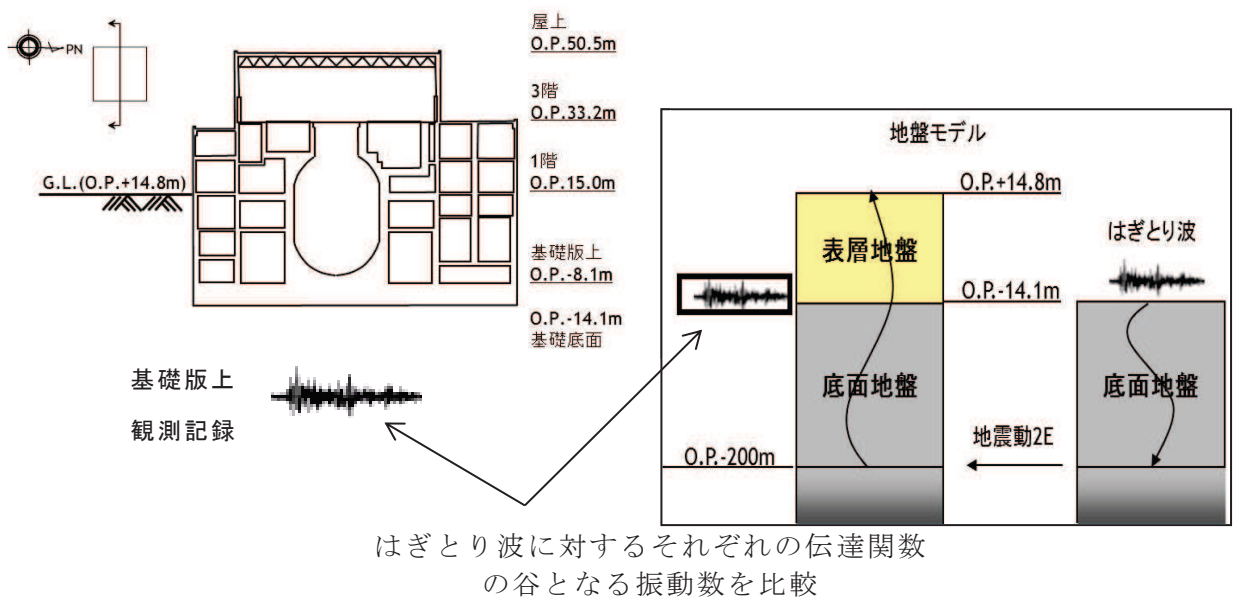
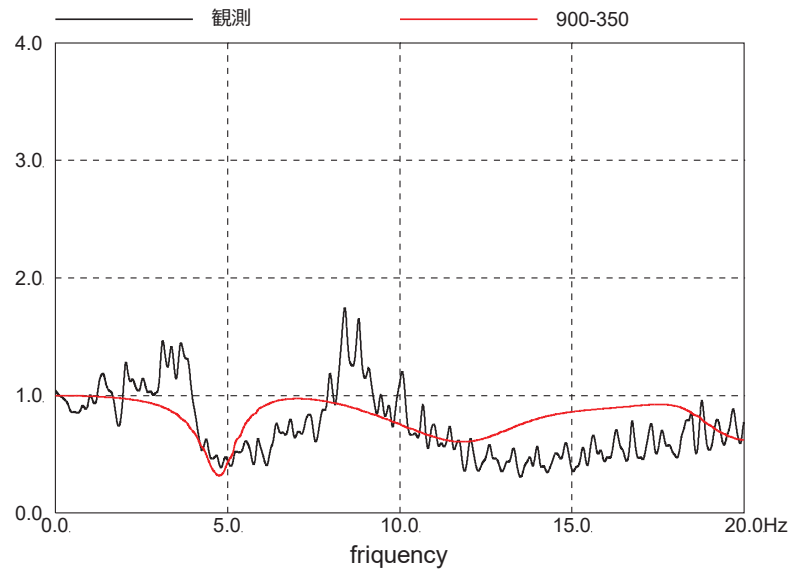
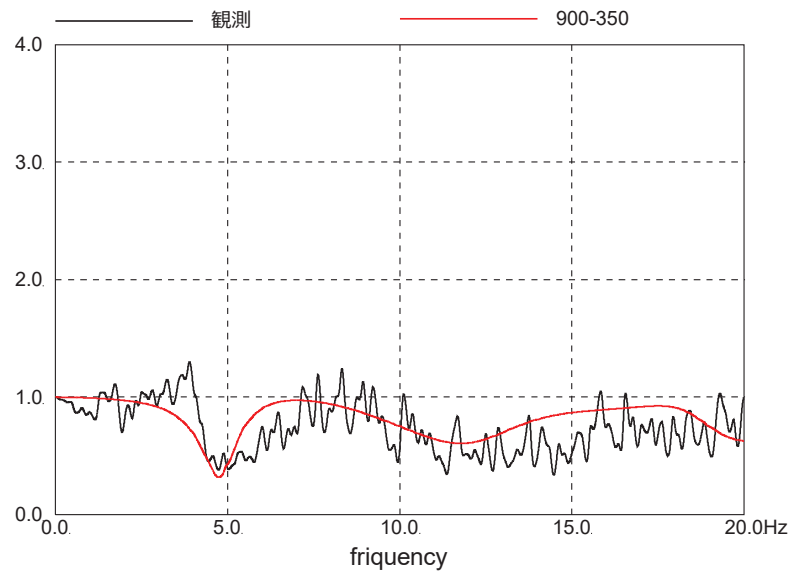


図 4-12 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動（E+F+P 波）の伝達関数の比較の概念

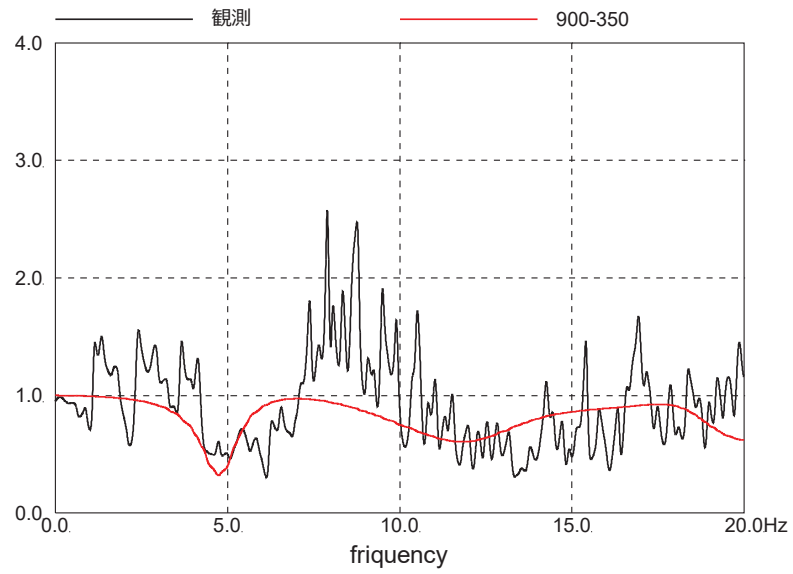


(a)NS 方向

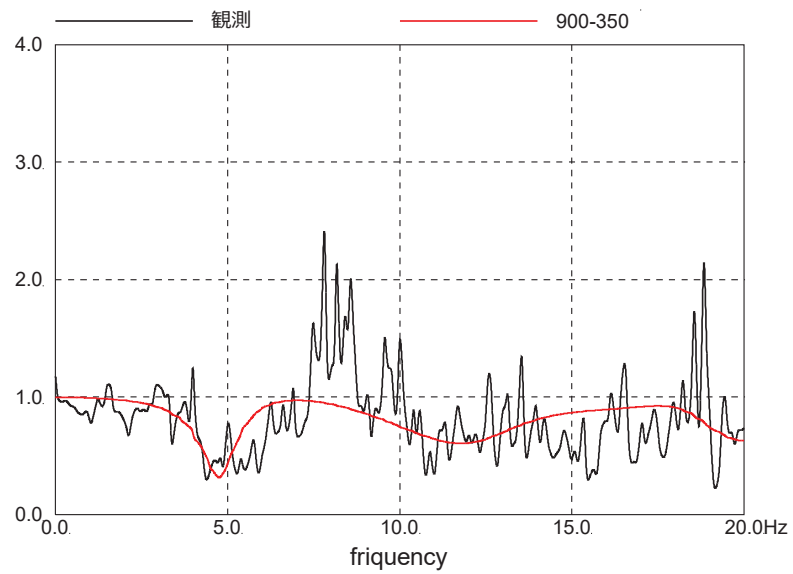


(b)EW 方向

図 4-13 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (3.11 地震)



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 4-14 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (4.7 地震)

(3) 仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

a. 表層地盤の層境界に関する検討（詳細は別紙6参照）

(a) 検討概要

「4.1.2 自由地盤における表層地盤の非線形化の傾向について」における自由地盤の最適化地盤モデルの検討では、表層地盤を分割すること、最表層地盤の物性値を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できることがわかっている。

建設時の掘削状況から仮設定した 0.P.0m の表層地盤の層境界について、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの層境界の最適値について検討する。

(b) 検討方法

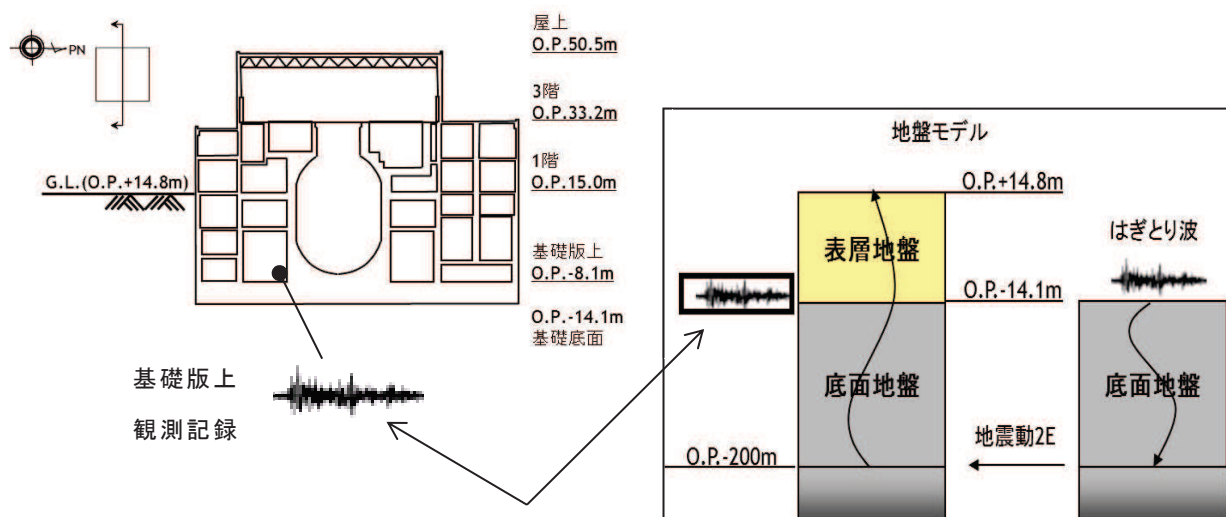
表層地盤の層境界 0.P.0m の検証として仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施する。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を 900m/s、表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  を 350m/s とし、表層地盤の層境界を 0.P.-2.0m ~ 0.P.2.0m の間で変動させて検討を実施する。表層地盤の層境界に関する検討用に仮定した地盤モデルの諸元を表 4-4 に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはざとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と、同じくはざとり波に対する検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (0.P.-14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は補正水平力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性及びはざとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震及び 4.7 地震とした。

表層地盤の層境界に関する検討方法の概念図を図 4-15 に示す。





はぎとり波に対するそれぞれの伝達関数の谷となる振動数を比較

図 4-15 表層地盤の層境界に関する検討方法の概念

表 4-4 表層地盤の層境界に関する検討用に仮定した地盤モデル  
(赤文字部分が仮定した値)

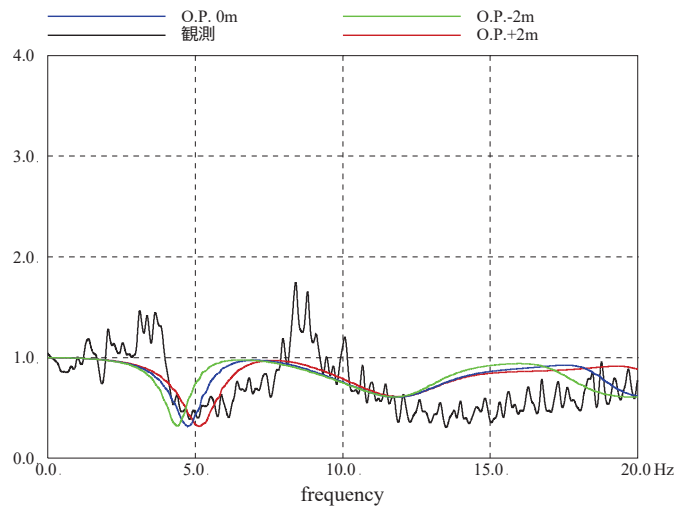
	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	350	3
	2.0~-2.0	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	900	3
底面地盤	-14.1	23.8 (2.43tf/m <sup>3</sup> )	1300	3
	-25.0	24.6 (2.51tf/m <sup>3</sup> )	2150	3
	-80.0	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3
	-200 ~ $\infty$	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3

(c) 検討結果

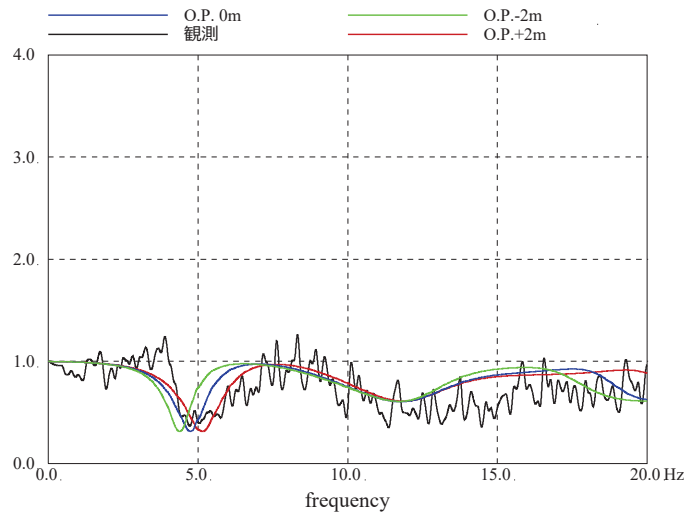
表層地盤の層境界に関する 3.11 地震による検討結果の伝達関数比較を図 4-16 に示す。また、床応答スペクトルの比較を図 4-17 に示す。

伝達関数を比較した結果、表層地盤の 1 次周期 (4~6Hz 付近) の再現性は、表層地盤の層境界を 0. P. 0m と設定した場合に観測記録との適合が良い。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討ほどの大きな差異は見られないものの、建屋の 1 次周期 (0. 2~0. 3 秒) 付近のピークに着目すると 0. P. -2. 0m の結果は観測記録に比べて小さい傾向にあり、0. P. 2. 0m の結果は観測記録に比べて過大に評価する傾向となっている。0. P. 0m が観測記録を平均的に表している。



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 4-16 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (3.11 地震)

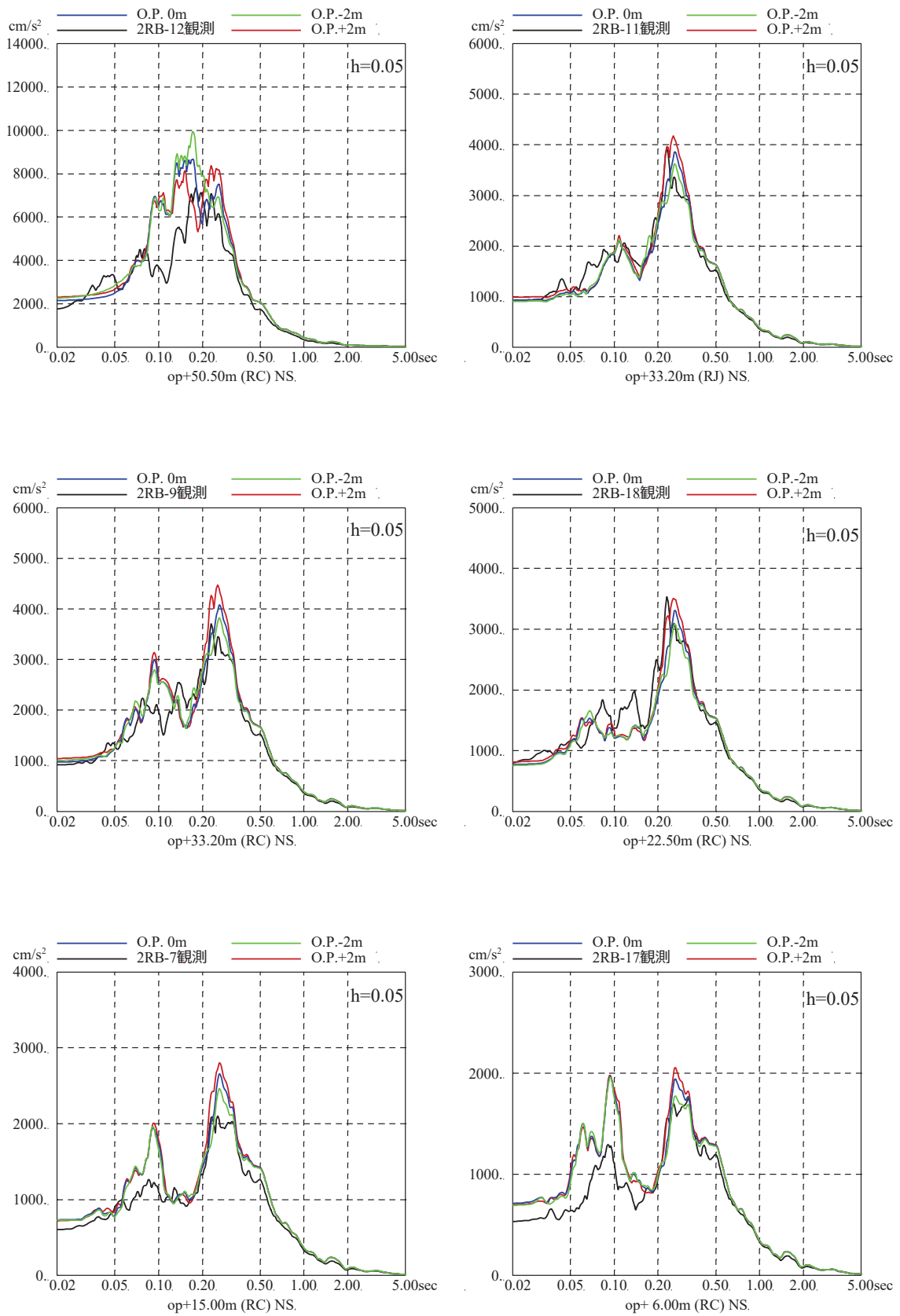


図 4-17 表層地盤の層境界に関する検討結果 (床応答スペクトルの比較)  
(3.11 地震, NS 方向, 建屋減衰 5%)

b. 表層地盤下部の地盤物性の検討（詳細は別紙7参照）

(a) 検討概要

自由地盤のはぎとり地盤モデルの傾向と PS 検層結果から表層地盤下部（O.P. 0m～O.P. -14.1m）のせん断波速度  $V_s$  は 900m/s に仮設定しているが、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの表層地盤下部のせん断波速度の最適値について検討する。

(b) 検討方法

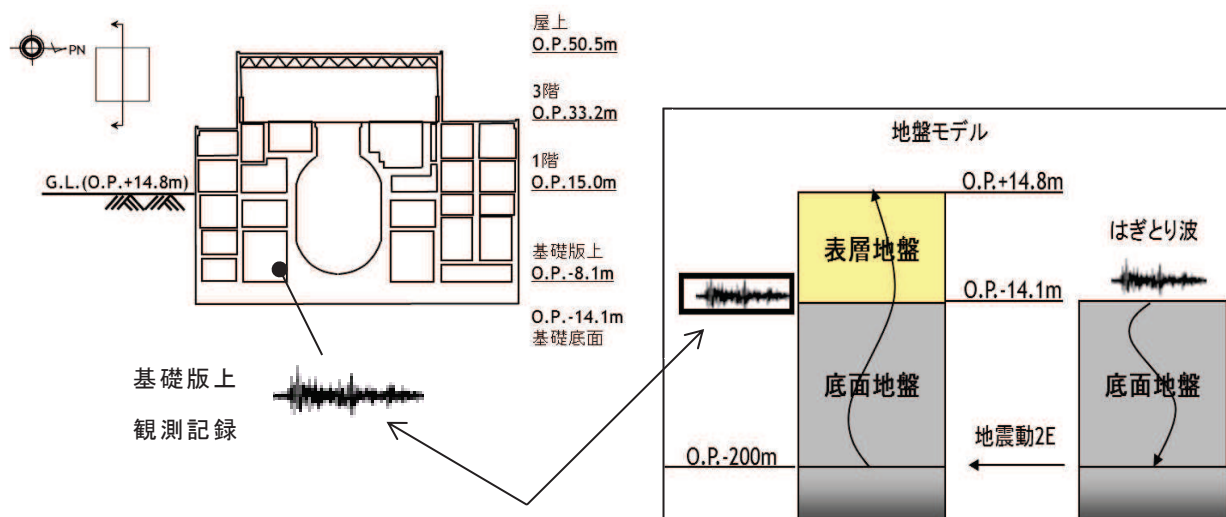
表層地盤下部（O.P. 0m～O.P. -14.1m）のせん断波速度  $V_s$  の検証として、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O.P. 0m、表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  を 350m/s とし、表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を 800～1000m/s の間で変動を考慮して検討を実施する。表層地盤下部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデルの諸元を表 4-5 に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と、同じくはぎとり波に対する検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル（O.P. -14.1m）の入力地震動（E+F+P 波、P は補正水平力の時刻歴波形）の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4～6Hz 付近の谷の再現性及びはぎとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震及び 4.7 地震とした。

表層地盤下部の地盤物性の検討方法の概念図を図 4-18 に示す。





はぎとり波に対するそれぞれの伝達関数の谷となる振動数を比較

図 4-18 表層地盤下部の地盤物性の検討方法の概念

表 4-5 表層地盤下部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル  
(赤字部分が仮定した値)

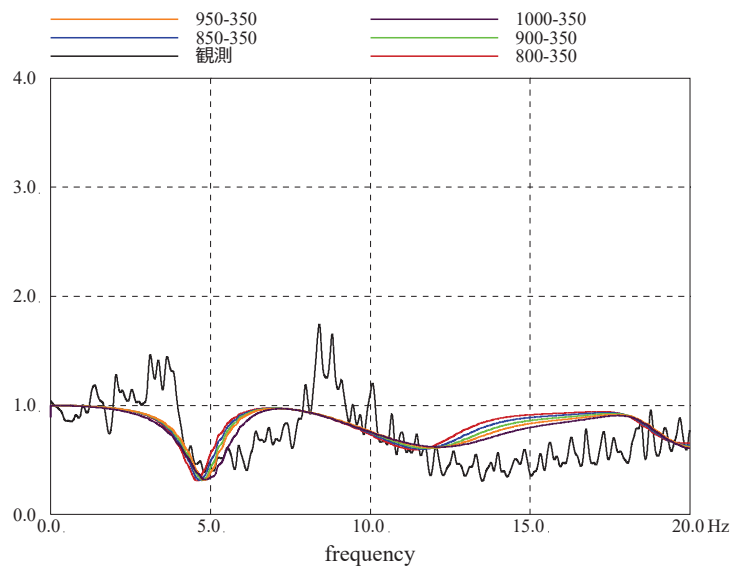
	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	350	3
	0.0	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	800~1000	3
底面地盤	-14.1	23.8 (2.43tf/m <sup>3</sup> )	1300	3
	-25.0	24.6 (2.51tf/m <sup>3</sup> )	2150	3
	-80.0	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3
	-200 ~ $\infty$	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3

(c) 検討結果

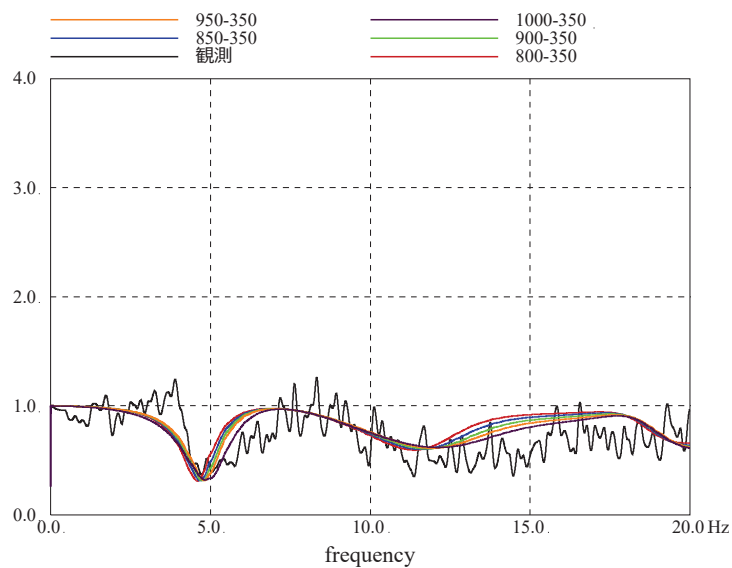
表層地盤下部の地盤物性の 3.11 地震による検討結果の伝達関数の比較を図 4-19 に示す。また、床応答スペクトルの比較を図 4-20 に示す。

検討結果から、伝達関数の検討結果から、伝達関数の谷の振動数(4~6Hz)は表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を 900m/s 程度に設定した場合に観測記録との適合が良い。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討ほどの大きな差異は見られない。



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 4-19 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (3.11 地震)

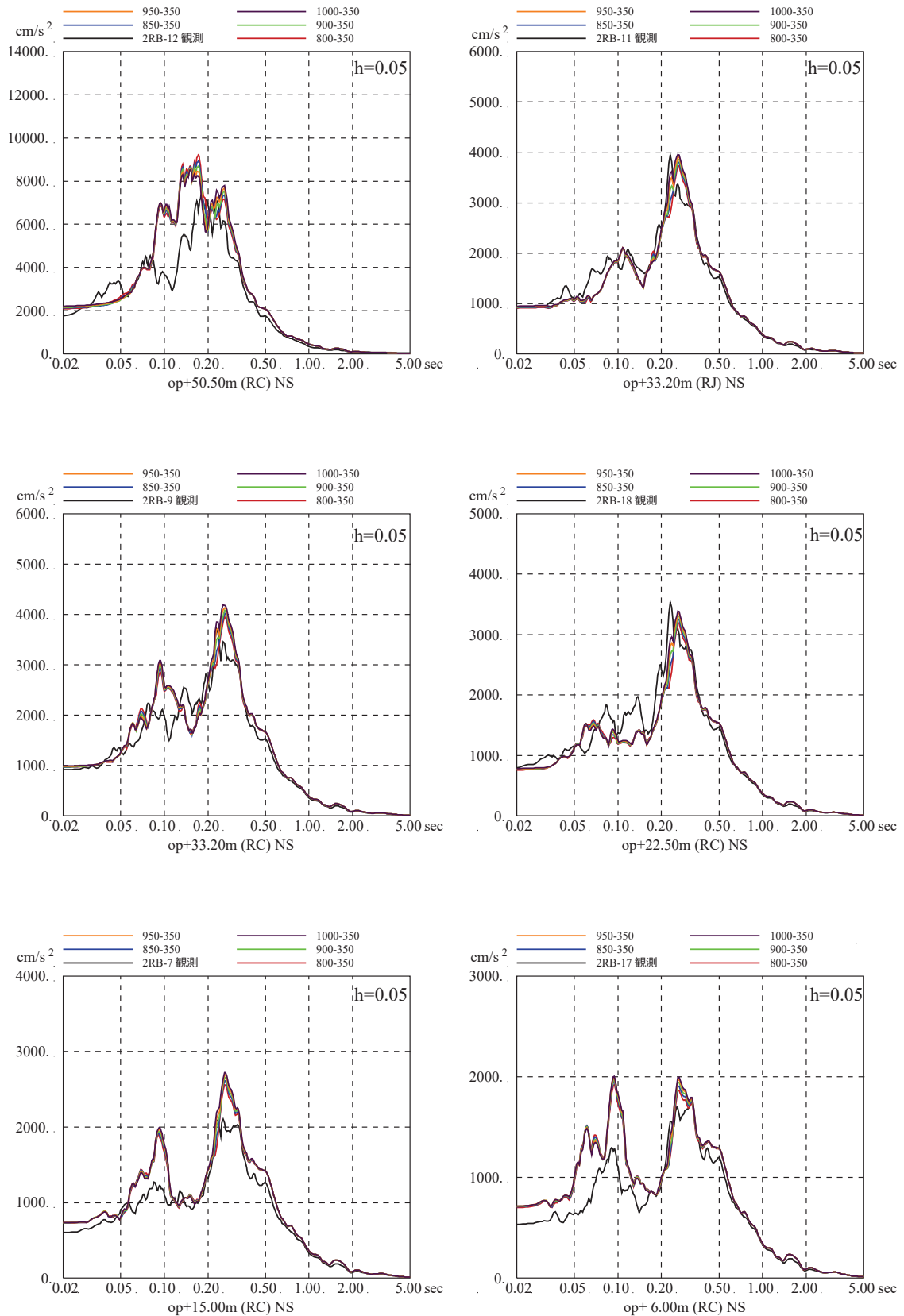


図 4-20 表層地盤下部の地盤物性の検討結果 (床応答スペクトル)  
(3.11 地震, NS 方向, 建屋減衰 5%)

c. 表層地盤上部の地盤物性の検討（非線形化による影響検討）

（詳細は別紙 8 参照）

(a) 検討概要

自由地盤のはぎとり地盤モデルの検討では、表層地盤を分割すること、表層地盤上部の物性値を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できることがわかっている。

表層地盤は、3.11 地震等による非線形化の影響が大きいと考えられることから、原子炉建屋の観測記録の分析からも表層地盤上部に非線形化の影響が現れているか検討する。

(b) 検討方法

表層地盤上部（O.P. +14.8m～O.P. 0m）の非線形化の有無を確認するため、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O.P. 0m、表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を 900m/s とし、表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  を 300～600m/s の間で変動させるモデルとする。表層地盤上部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデルの諸元を表 4-6 に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と、同じくはぎとり波に対する検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル（O.P. -14.1m）の入力地震動（E+F+P 波、P は補正水平力の時刻歴波形）の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4～6Hz 付近の谷の再現性及びはぎとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。検討に用いた地震は、過去に観測された加速度振幅の大きい地震と 3.11 地震直前の 2011 年 3 月 9 日の地震とし、その諸元を表 4-7（検討に用いた地震諸元）に示す。

表層地盤上部の地盤物性の検討方法の概念図を図 4-21 に示す。

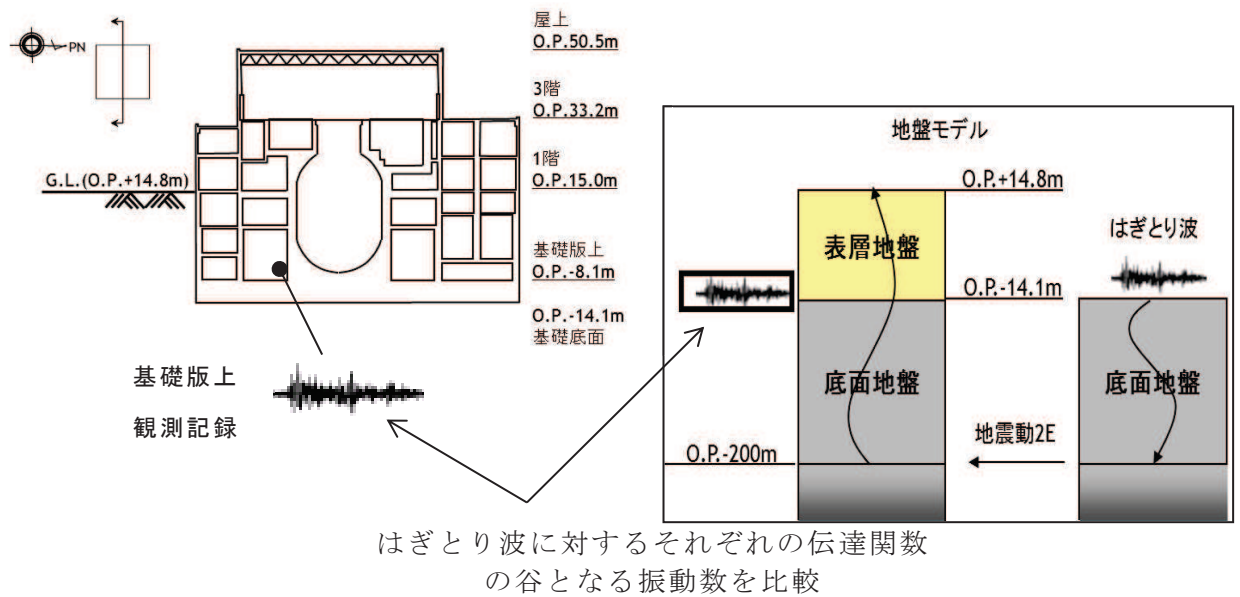


図 4-21 表層地盤上部の地盤物性の検討方法の概念



表 4-6 表層地盤上部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル  
(赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	300~600	3
	0.00	23.3 (2.38tf/m <sup>3</sup> )	900	3
底面地盤	-14.10	23.8 (2.43tf/m <sup>3</sup> )	1300	3
	-25.00	24.6 (2.51tf/m <sup>3</sup> )	2150	3
	-80.00	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3
	-200.0	25.0 (2.55tf/m <sup>3</sup> )	2440	3

表 4-7 検討に用いた地震諸元

地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点(地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) (cm/s <sup>2</sup> )		
			NS 方向	EW 方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396

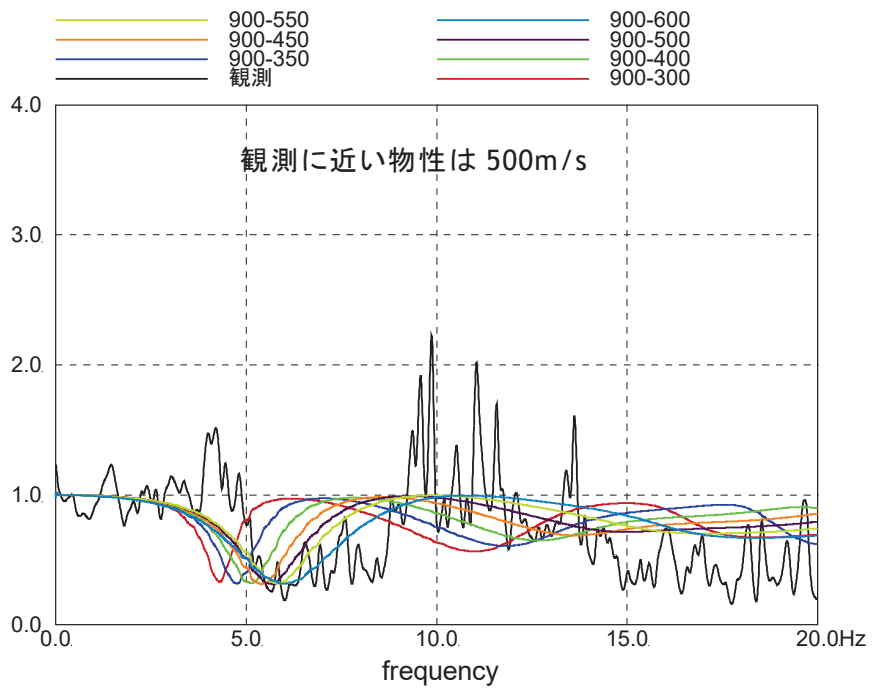
(c) 検討結果

はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と、同じくはぎとり波に対する入力地震動（E+F+P 波）の伝達関数の比較を図 4-22～図 4-25 に、はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較を図 4-26 に示す。

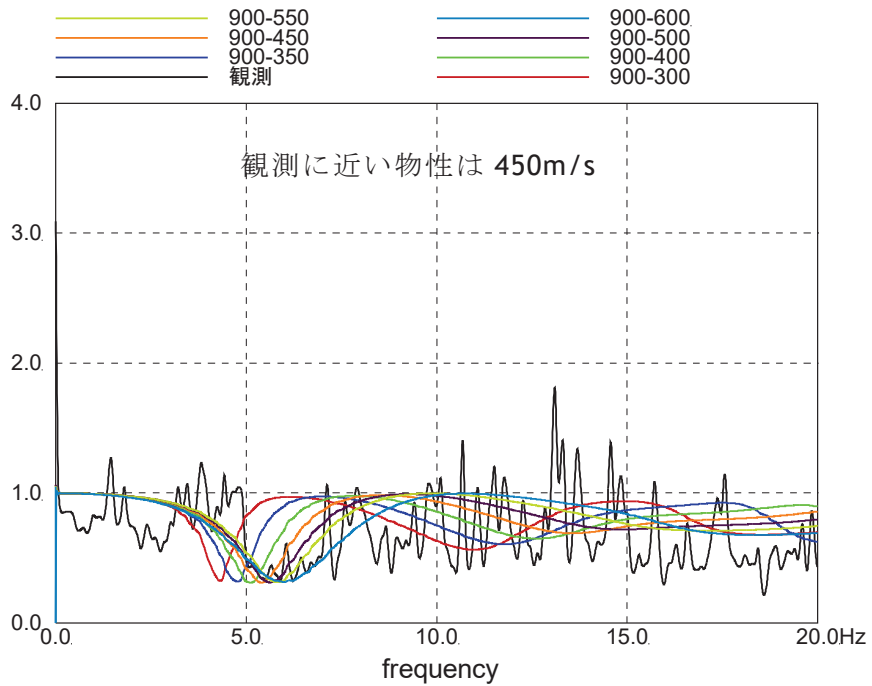
伝達関数の比較においては、2005/8/16 宮城県沖の地震と 2011/3/9 の地震では、表層地盤上部のせん断波速度  $V_s$  が 450m/s～500m/s の場合に観測記録に対応するが、3.11 地震と 4.7 地震では、350m/s の場合が観測記録と良い対応を示している。

地震動の振幅レベルにより表層地盤上部の最適となるせん断波速度が異なることから、表層地盤上部では非線形化の影響が確認された。応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討ほどの大きな差異は見られなかった。

このことから、表層地盤上部には入力地震動の大きさにより地盤の剛性低下等を考慮できる非線形地盤モデルを設定する必要があることが確認された。

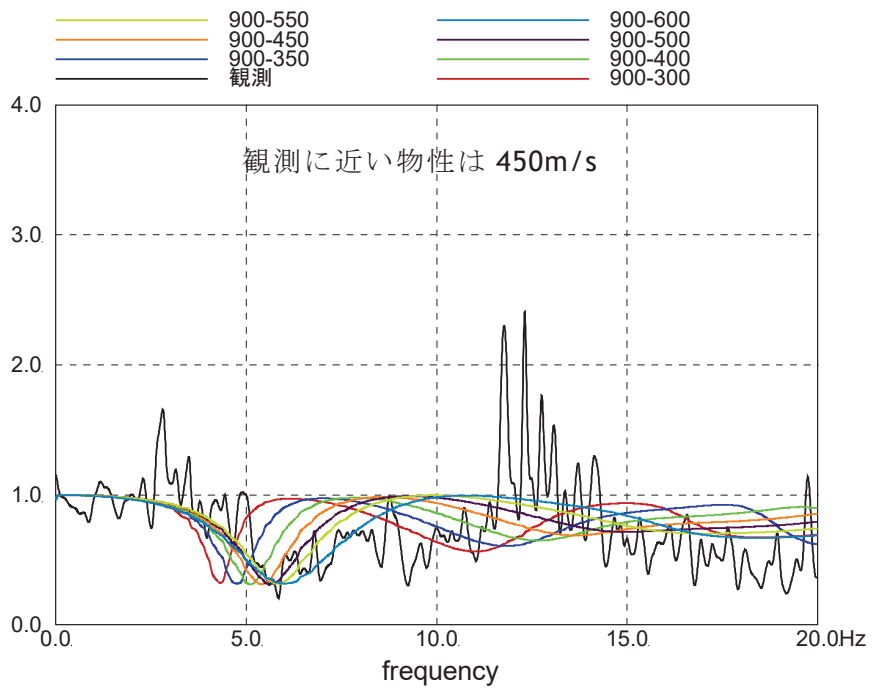


(a) NS 方向

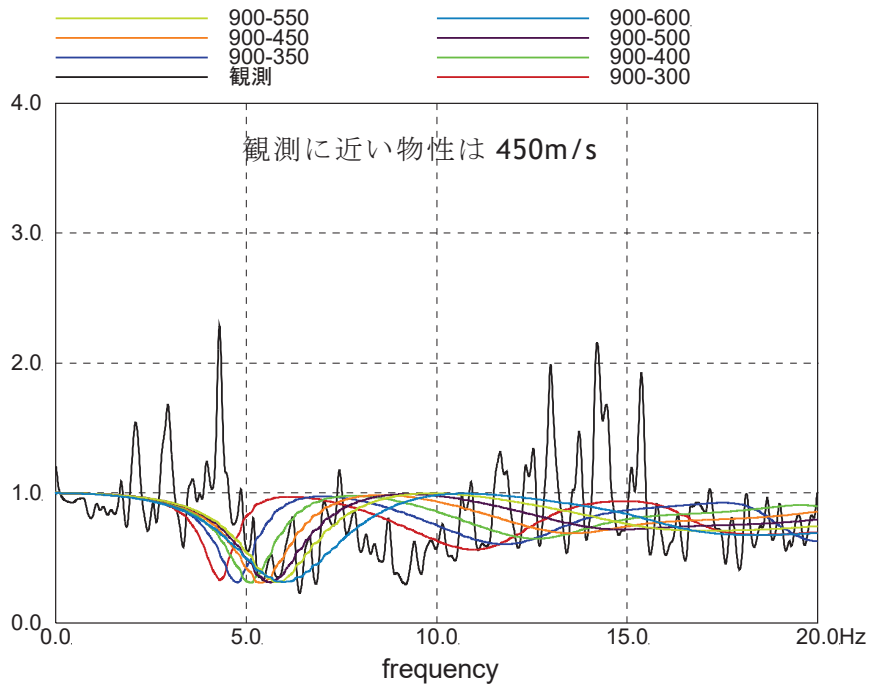


(b) EW 方向

図 4-22 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (2005/8/16 宮城県沖の地震)

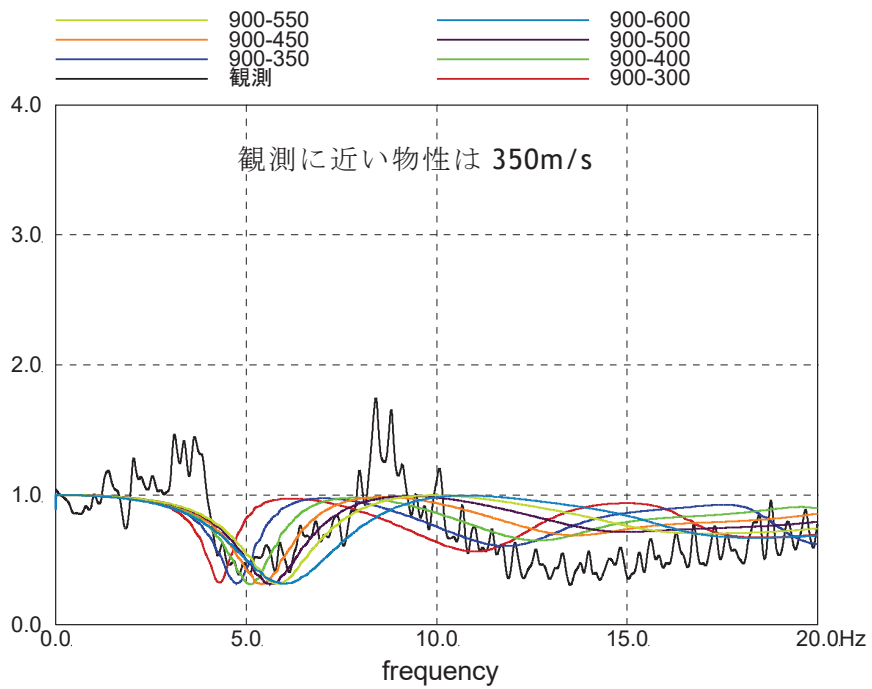


(a) NS 方向

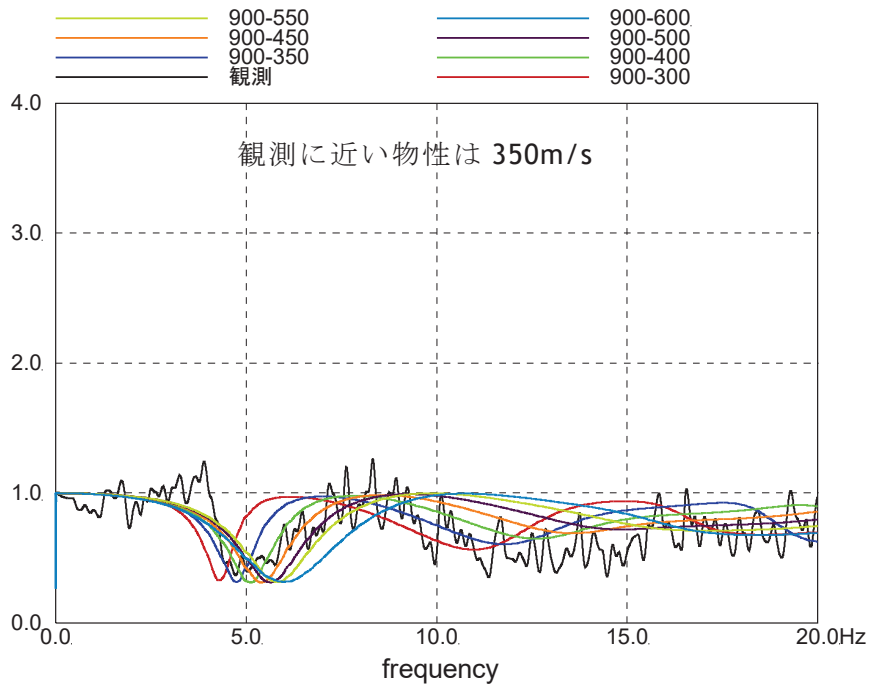


(b) EW 方向

図 4-23 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (2011/3/9 の地震)



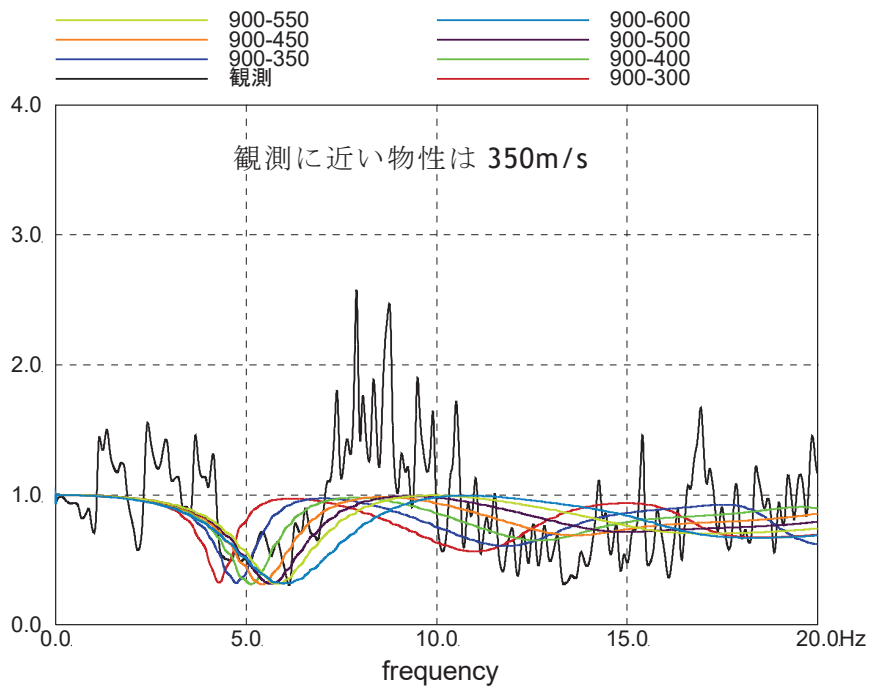
(a) NS 方向



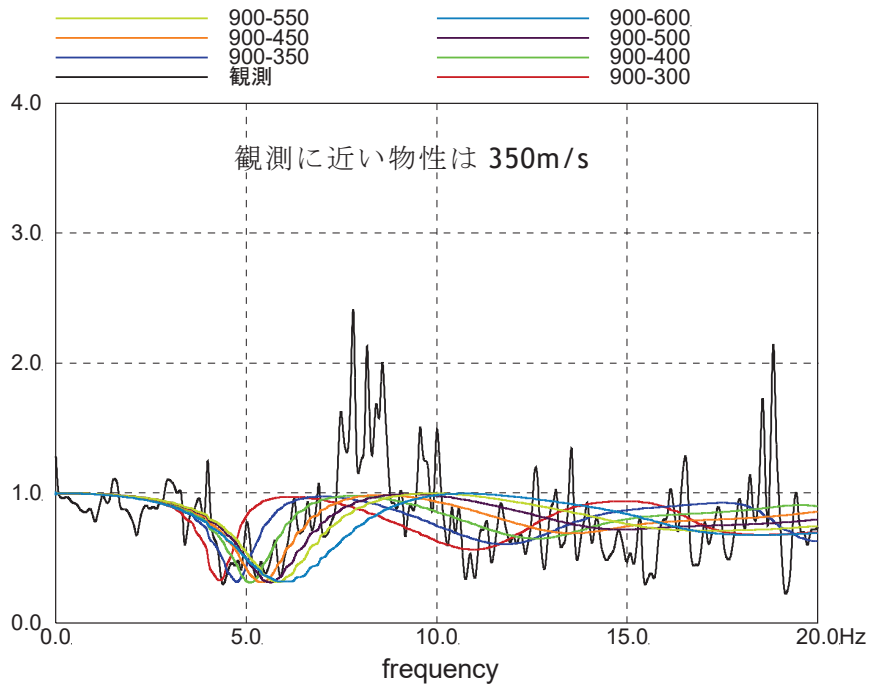
(b) EW 方向

図 4-24 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (3.11 地震)





(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 4-25 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較 (4.7 地震)

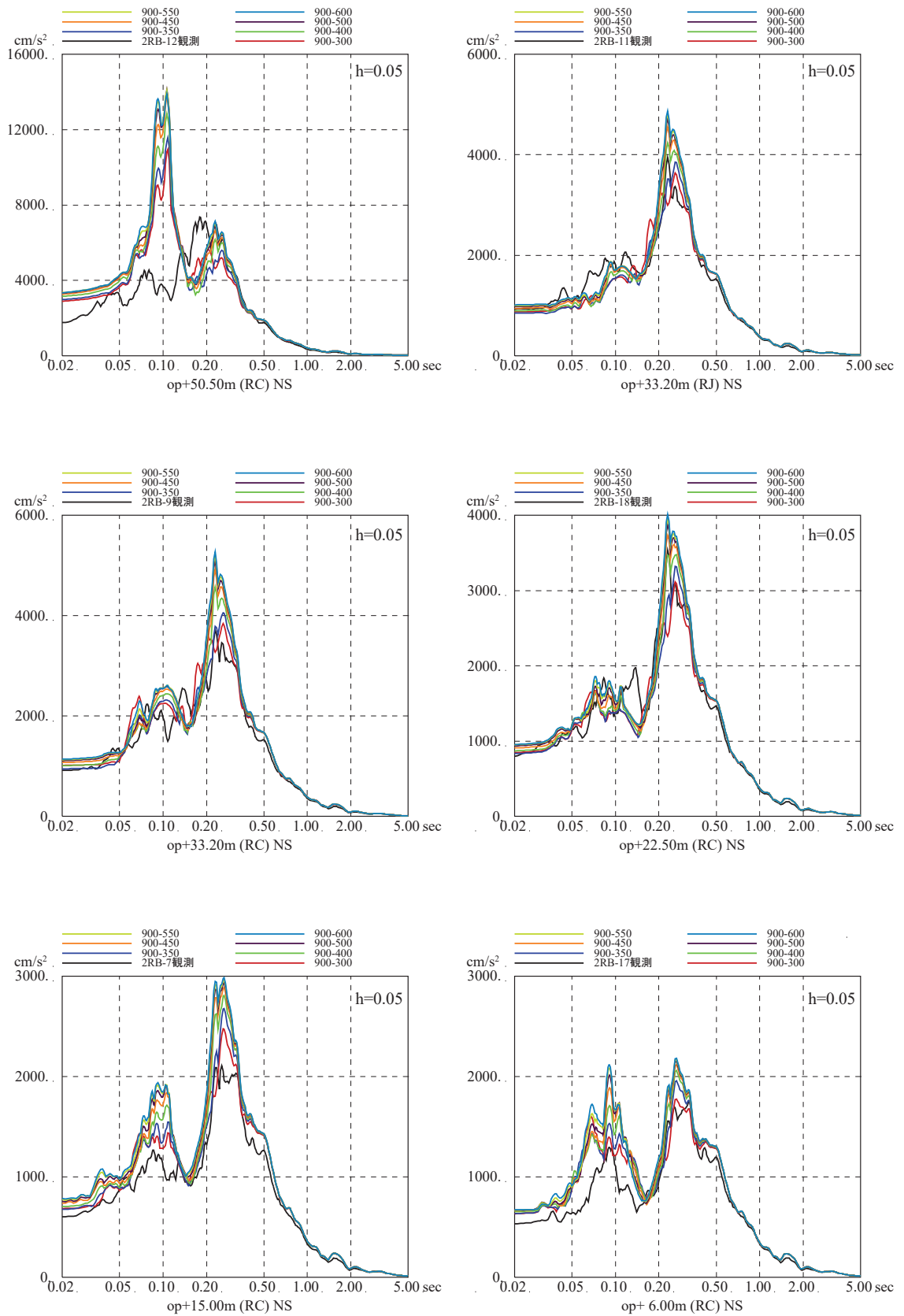


図 4-26 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較  
(3.11 地震, NS 方向, 建屋減衰 5%)

d. ベースとなる地盤モデルの設定（詳細は別紙9参照）

これまでの仮設定した地盤モデルの検討結果から以下のことが確認されたことから、基準地震動  $S_s$  に対する評価にあたり、原子炉建屋のベースとなる地盤モデルは表 4-8 に示す地盤モデルとする。

- ① 表層地盤は 2 層地盤とし、層境界を O.P. 0m に設定すると観測記録との適合が良いこと。
- ② 表層地盤のうち、下部については、せん断波速度  $V_s$  を 900m/s に設定すると観測記録との適合が良いこと。
- ③ 表層地盤のうち、上部については、地震動の振幅レベルにより最適となるせん断波速度  $V_s$  が異なることから非線形性を考慮する必要があること。

表 4-8 原子炉建屋 ベースとなる地盤モデル

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	地震動の振幅レベルに応じた非線形性を考慮した地盤物性とする	
	0.00	23.3	900	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

(4) 表層地盤の非線形化を考慮した基準地震動  $S_s$  評価用地盤モデルの設定

前項までの検討において、表層地盤上部 (0.P. 14.8m~0.P. 0m) については、地震動の振幅レベルに応じた非線形特性を考慮する必要があることが確認された。

表層地盤上部の地盤物性値は、波動伝播特性評価において主に盛土の影響が強い層であることから盛土の物性値を流用することとして、非線形特性を設定する。

盛土の物性値は、地盤調査結果を基に初期せん断剛性  $G_0$ 、 $G/G_0-\gamma$  曲線及び  $h-\gamma$  曲線の非線形特性を設定する。盛土物性値の調査位置を図 4-27 に示す。また、各試験結果から設定した盛土物性値を表 4-9 に示す。

表層地盤上部に非線形特性を考慮した地盤モデルを表 4-10 に示す。

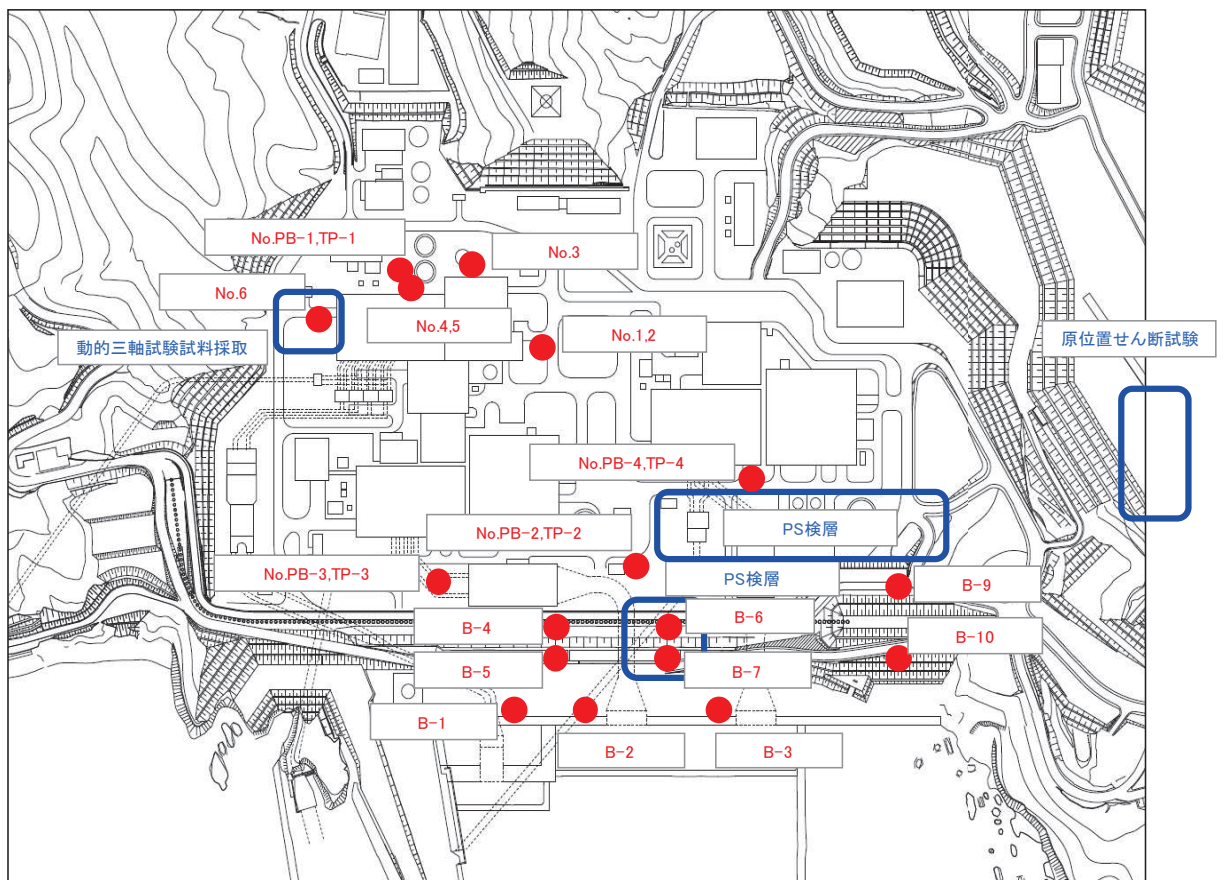


図 4-27 盛土ほかの調査位置図

表 4-9 各試験結果から設定した盛土の解析用物性値

地盤	強度定数		初期せん断剛性 $G_0$ ( $N/mm^2$ )	減衰
	粘着力 $C(N/mm^2)$	内部摩擦角 $\phi (^{\circ})$		
盛土 地下水 位以浅	0.1	33.9	$1787 \sigma_c^{0.84}$	$h=0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$

表 4-10 原子炉建屋地盤物性

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 <sup>*2</sup> h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3 <sup>*3</sup>
	0.00	23.3	900 <sup>*4</sup>	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

注記\*1：O. P. 14.8m～O. P. 0m は，上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断剛性  $G_0$  を設定する。また，ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

\*2：レーリー減衰

\*3：ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

\*4：PS 検層結果と観測記録の分析より設定

初期せん断剛性  $G_0$  は、PS 検層結果により (4.3-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (4.3-1)$$

$$\text{ここで, } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z : \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0 - \gamma$  曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度  $\tau_m$  と初期せん断剛性  $G_0$  から、基準ひずみ  $\gamma_m$  を算定し (4.3-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (4.3-2)$$

$$\text{ここで, } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$h - \gamma$  曲線は、繰返し三軸試験結果に基づき (4.3-3) 式により求める。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (4.3-3)$$



#### 4.3.2 観測記録を用いた入力地震動評価用地盤モデルの検証(詳細は別紙10参照)

##### (1) 検討概要

入力地震動評価用地盤モデルの表層地盤上部の非線形特性は地盤物性試験に基づき設定しているが、この非線形特性が過去の様々な地震動の振幅レベルの地震観測記録と整合する結果を与えるかどうかを確認する。

##### (2) 検討方法

自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と、同じくはぎとり波に対する「4.3 基準地震動  $S_s$  に対する入力地震動評価用地盤モデルの設定概要」において設定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(0.P.-14.1m)の入力地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数に表れる表層地盤の1次周期に対応する4~6Hz付近の谷の再現性を確認することにより検討する(図4-28参照)。検討に用いた地震諸元を表4-11に示す。

3.11地震については、はぎとり波を用いて算定した基礎版底面レベル(0.P.-14.1m)の入力地震動を用いて、建屋のシミュレーション解析を実施する。解析結果と地震観測記録を比較することにより地盤モデルの検討を行う。また、参考に基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析の結果も合わせて示す。シミュレーション解析の概要を図4-29~図4-31に、解析条件を表4-12に示す。

##### (3) 検討結果

検討に用いた代表地震に対する伝達関数を比較して図4-32に示す。いずれの地震についても伝達関数の谷の位置を概ね再現している。

3.11地震のはぎとり波を用いた場合と基礎版上観測記録を用いた場合のシミュレーション解析結果の比較を図4-33に示す。

3.11地震のはぎとり波を用いたシミュレーション解析結果は、EW方向の周期0.1秒より短周期側で観測記録より過大評価になる傾向があるが、それ以外は、観測記録に対して、基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析と同等の適合度となっている。

なお、EW方向の周期0.1秒より短周期側で観測記録より過大評価となる傾向についての考察は以下のとおりである。

①図4-34に基礎版上の床応答スペクトルについて、3.11地震のはぎとり波を用いたシミュレーション解析結果と、基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果及び基礎版上観測記録を比較して示す。NS方向、EW方向共に、はぎとり波を用いたシミュレーション解析結果の床応答スペクトル

ルは周期 0.08 秒付近で基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果を若干上回っている。

②図 4-35 に基礎版上に対する各階の伝達関数を示す。はぎとり波を用いた場合と基礎版上観測記録を用いた場合の伝達関数はほぼ重なっており、建屋応答による差異はないことが確認できる一方で、周期 0.08 秒に対応する 12.5Hz 付近の各階の伝達関数は、NS 方向が谷になっており、EW 方向が山になっている。

③以上のことから、EW 方向の建屋上部の周期 0.08 秒付近の応答が特に大きくなっていると考えられる。

また、図 4-33(1)の床応答スペクトルの比較から、NS 方向地上 2 階(0. P. 22. 5m)の観測記録(2RB-18)の周期 0.15 秒付近の応答がシミュレーション解析より大きくなっていることから、その要因について分析する。

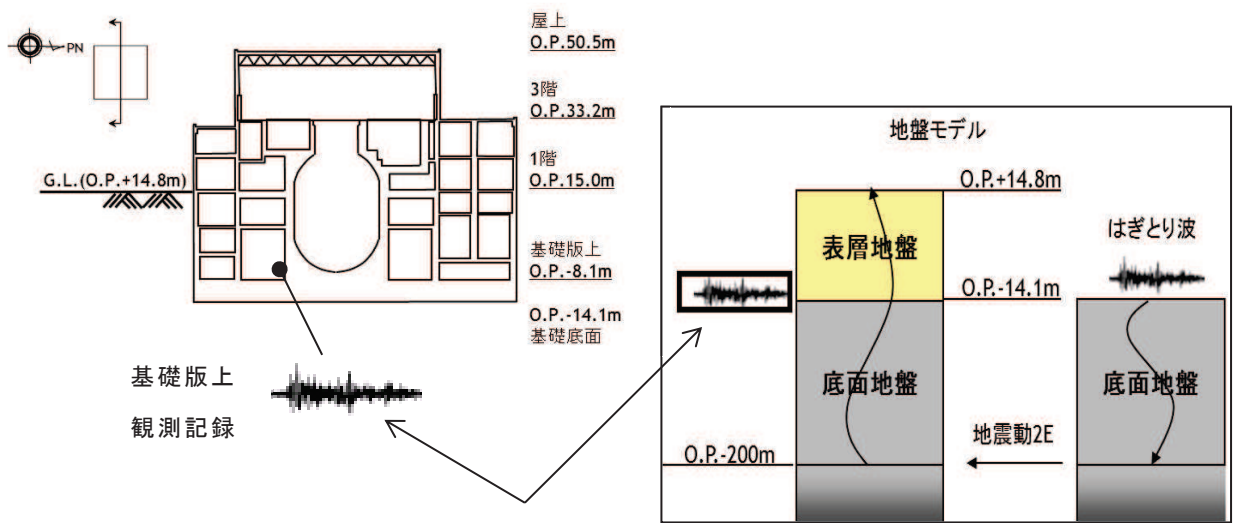
図 4-36 (1) に 2F 地震計の設置位置の詳細図を示す。2F の地震計の設置位置は、EW 方向の IW-4 の耐震壁に平行な R3 通りの壁の近傍に配置されているが、NS 方向の壁からは離れており、その間には EV の床開口が存在している。従って、2RB-18 の地震計の NS 方向の応答は、床開口の影響を含んでいる可能性が考えられる。

このような局所的な応答の影響を検証するため、3次元モデルを用いて、2RB-18 の地震計位置に相当する節点(以下「節点 A」という。)と質点系モデルの質点位置に相当する IW4 と IWC の交点付近の節点(以下「節点 B」という。)の伝達関数を確認する。

図 4-36 (2) に 3次元モデルの基礎観測点(2RB-6)に対する地上 2 階の節点 A 及び節点 B の伝達関数を示す。節点 B は耐震壁位置にあるため、質点系モデルの応答に近いと考えられる。NS 方向成分については、節点 A の伝達関数はほとんどの振動数で節点 B の伝達関数より振幅が大きくなっている。周期 0.15 秒(6.67Hz)前後に着目すると、6Hz~10.5Hz 付近及び 12Hz~14Hz 付近で大きくなっており、この特徴は、地上 2 階の観測記録(2RB-18)の応答スペクトルにほぼ整合している。

以上の結果から、NS 方向地上 2 階(0. P. 22. 5m)の観測記録(2RB-18)の応答スペクトルがシミュレーション解析より大きくなるのは、地震計の設置位置が NS 方向の耐震壁から離れた位置に設置されていること、地震計設置位置の近くに床開口があることによる局所的な応答の影響を含んでいることが考えられる。

以上のことから、策定した入力地震動評価用地盤モデルは 3.11 地震等の過去の地震に対し、適用可能であることを確認した。



はぎとり波に対するそれぞれの伝達関数の谷となる振動数を比較

図 4-28 表層地盤物性の検討方法の概念

表 4-11 検討に用いた地震諸元

地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点(地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) ( $\text{cm/s}^2$ )		
			NS 方向	EW 方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396

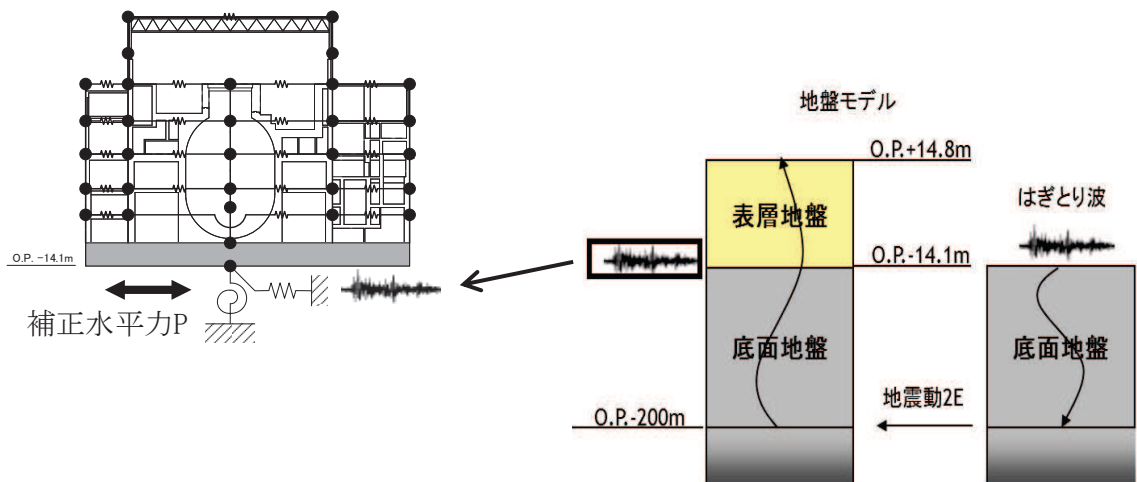


図 4-29 はぎとり波を用いたシミュレーション解析手法の概念図

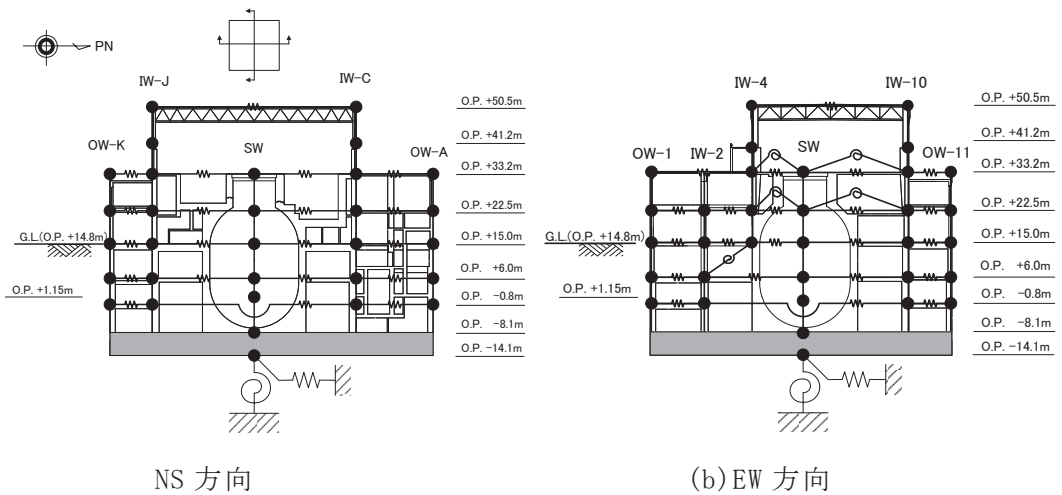


図 4-30 建屋シミュレーション解析モデル

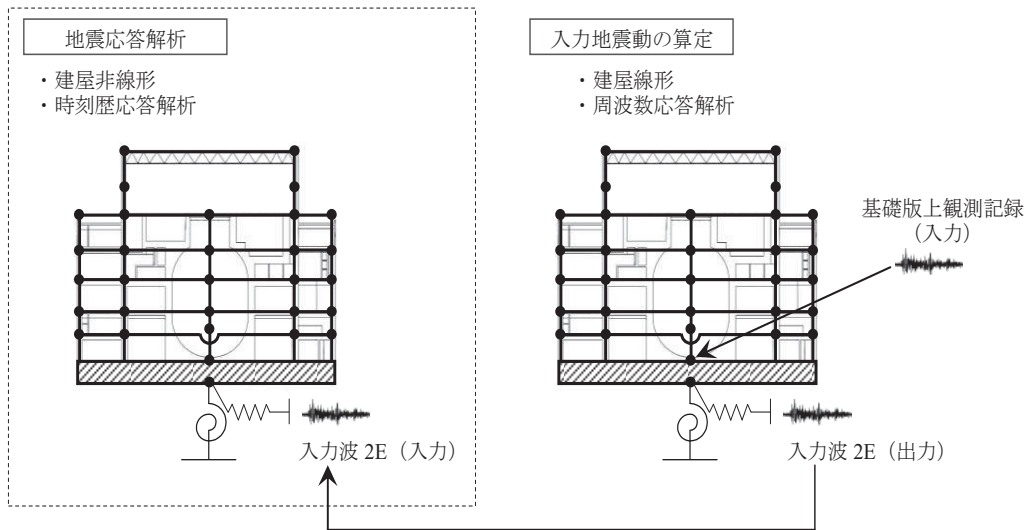
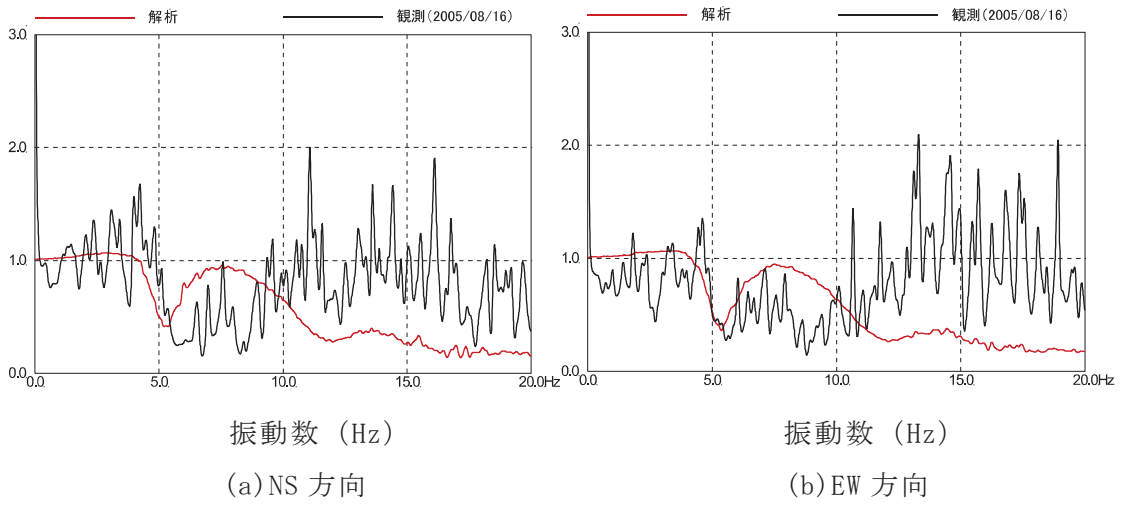


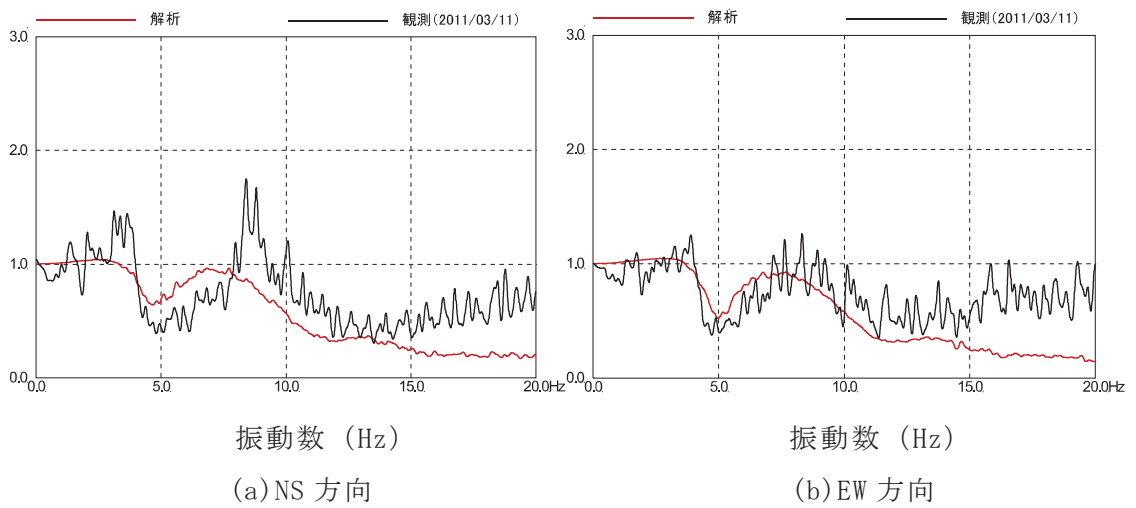
図 4-31 基礎版上観測記録を用いた建屋シミュレーション解析の概念図

表 4-12 解析条件

ケース	はぎとり波を用いた シミュレーション解析	(参考) 基礎版上観測記録を用いた シミュレーション解析
建屋	原子炉建屋	
地震動	3.11 地震のはぎとり波	3.11 地震の基礎版上観測記録
入力地震動	基礎版底面レベルの 地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)	基礎版底面レベルの 地震動を逆算し入力 (2E 入力)
建屋モデル	3.11 地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰 7%, 側面地盤ばね無し)	
地盤モデル	S <sub>s</sub> 評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	—



2005/8/16 宮城県沖の地震



3.11 地震

図 4-32 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力地震動 (E+F+P 波) の伝達関数の比較



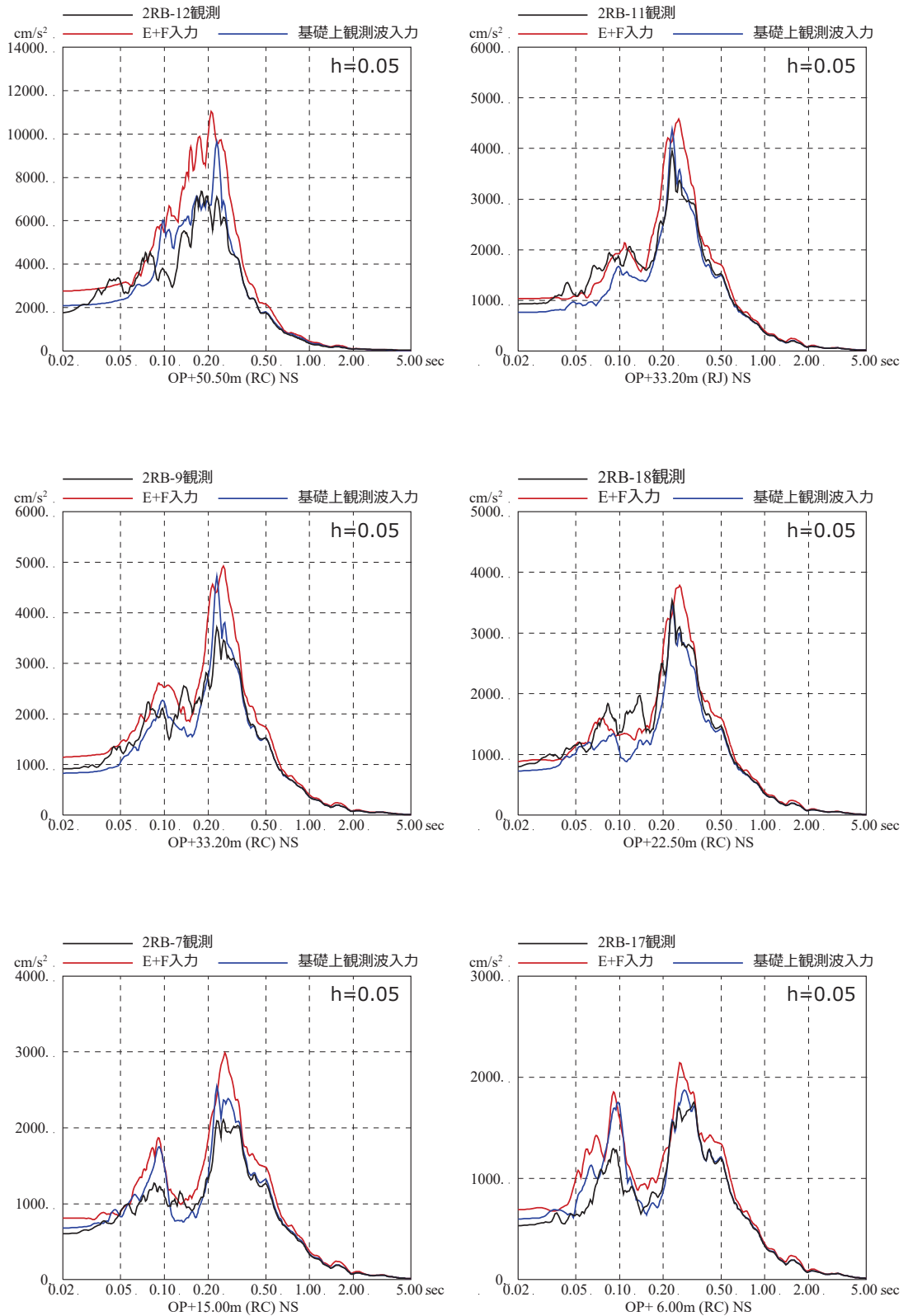


図 4-33(1) 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と  
基礎版上観測記録を用いた場合のシミュレーション解析結果の比較  
(原子炉建屋, NS 方向)

※地震計位置は、付録 1 参照

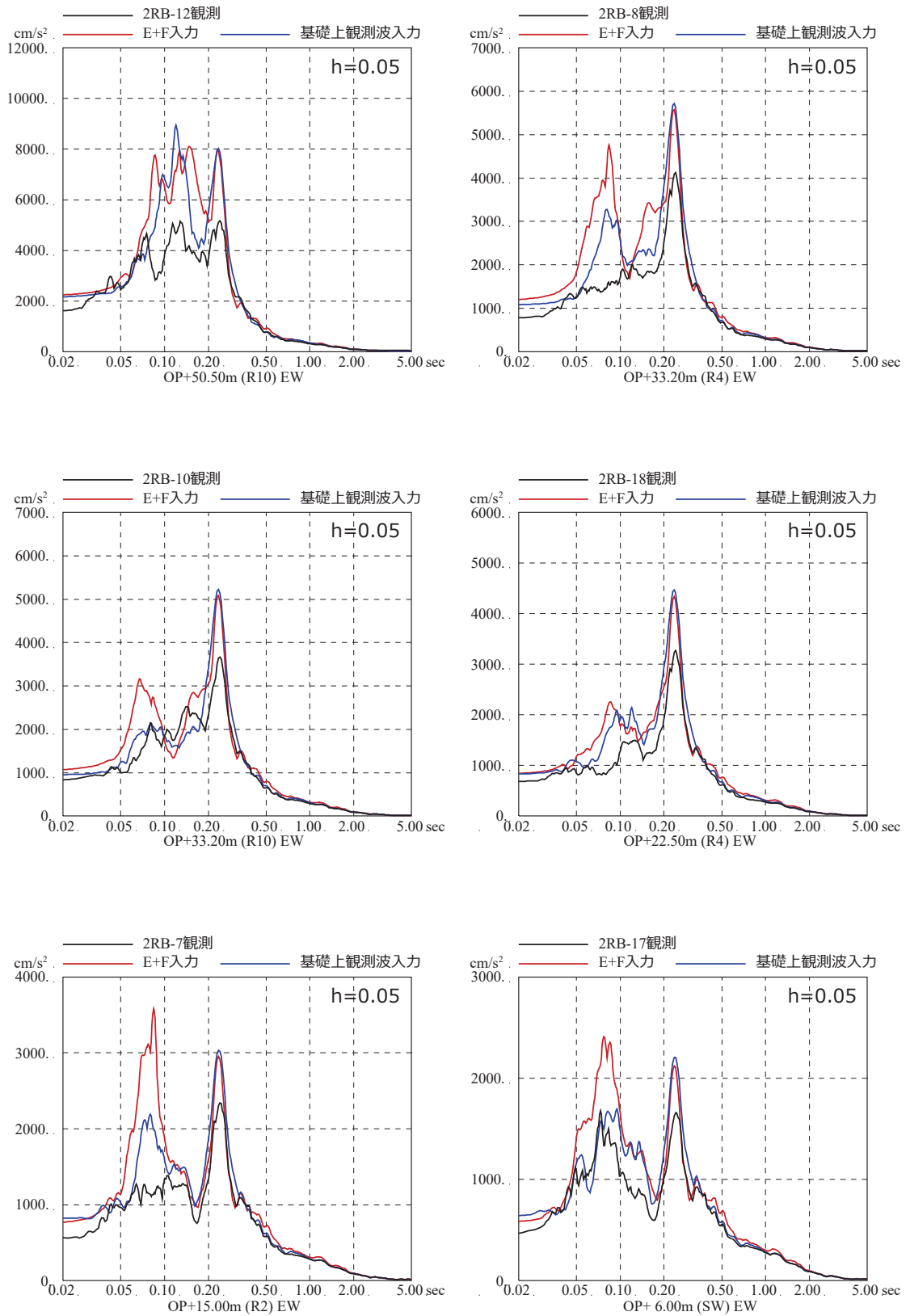


図 4-33(2) 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と  
基礎版上観測記録を用いた場合のシミュレーション解析結果の比較  
(原子炉建屋, EW 方向)

※地震計位置は、付録 1 参照

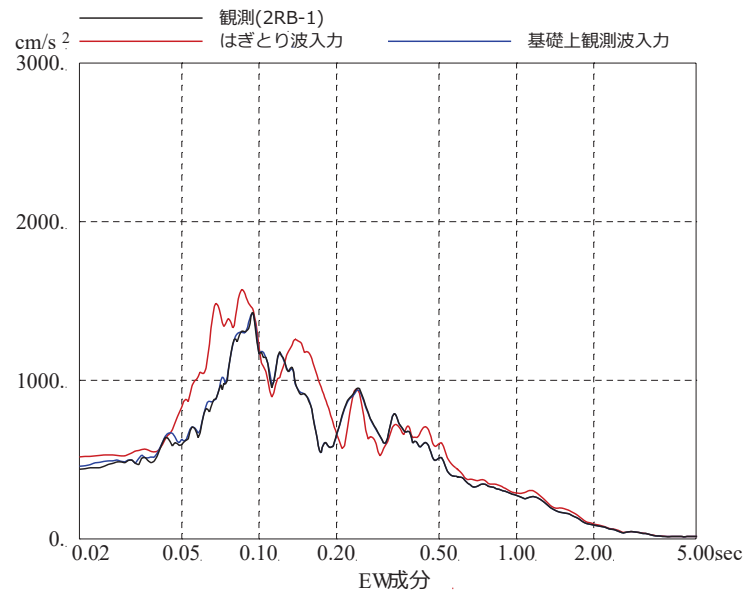
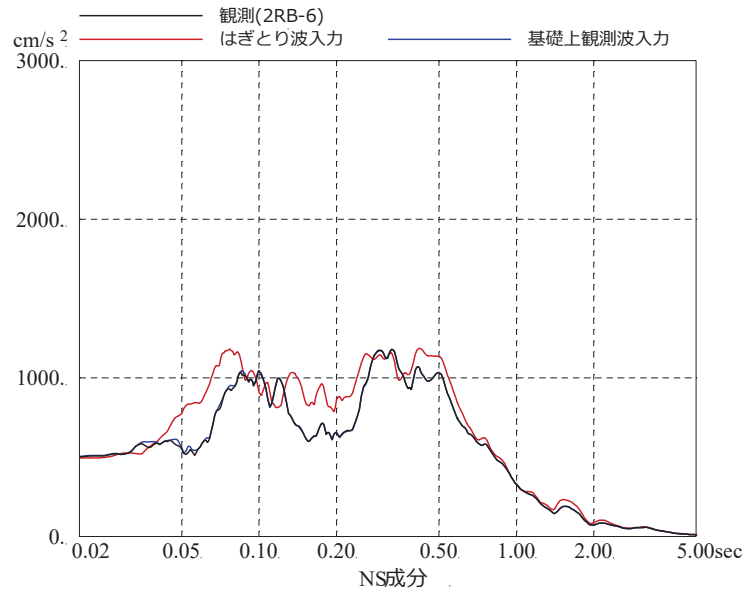
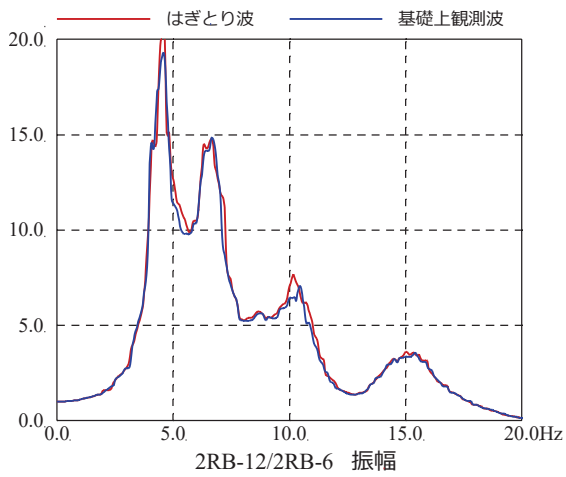
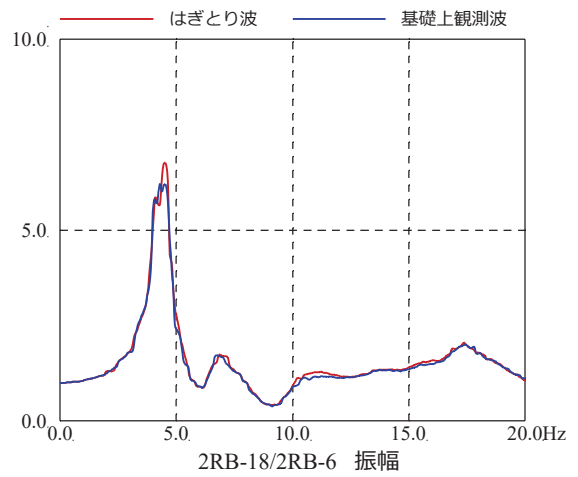


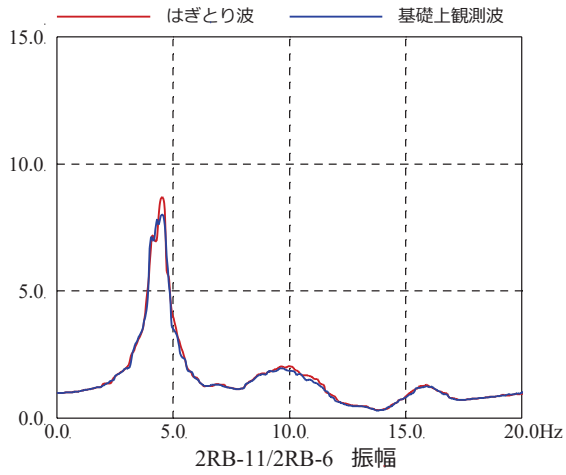
図 4-34 基礎版上の床応答スペクトルの比較



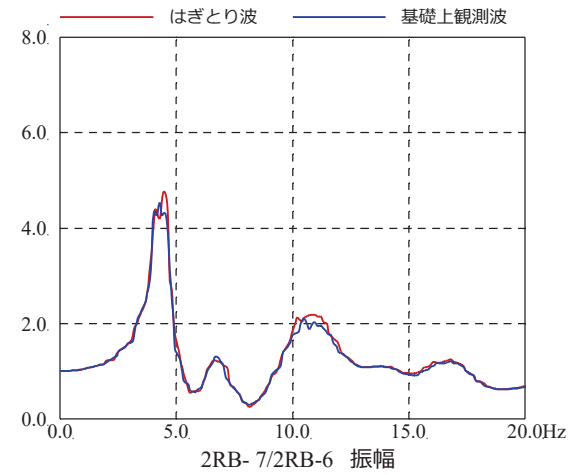
屋上 (0. P. 50.5m)



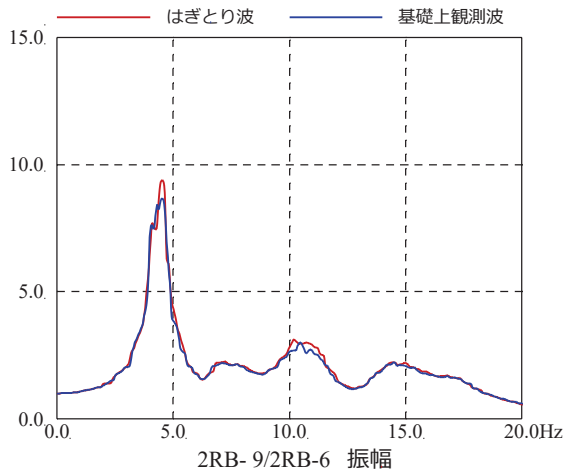
地上 2 階 (0. P. 22.5m)



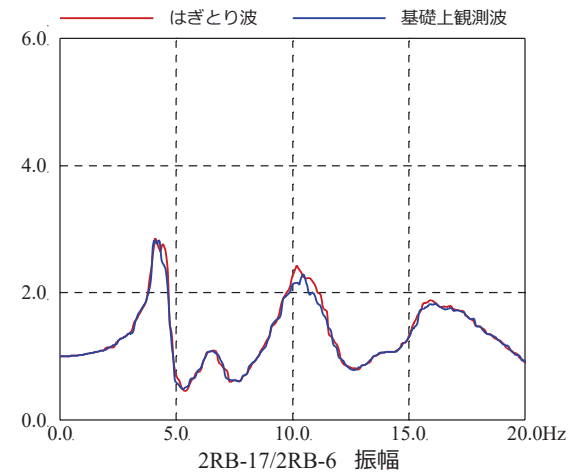
地上 3 階 (0. P. 33.2m)



地上 1 階 (0. P. 15.0m)



地上 3 階 (0. P. 33.2m)



地下 1 階 (0. P. 6.0m)

図 4-35(1) 床応答波形の伝達関数 (NS 方向)

注：地震計位置は、付録 1 参照

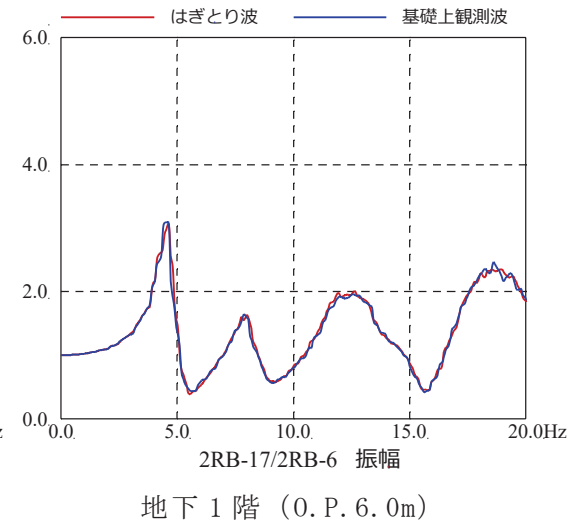
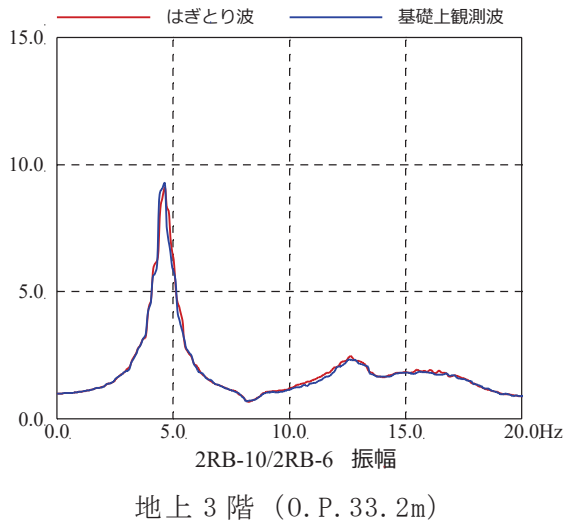
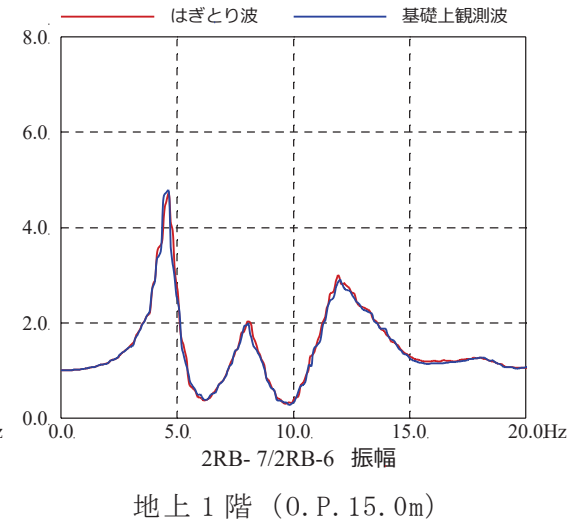
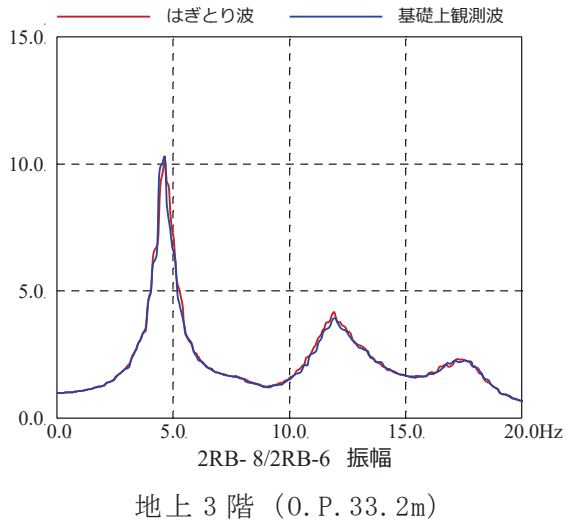
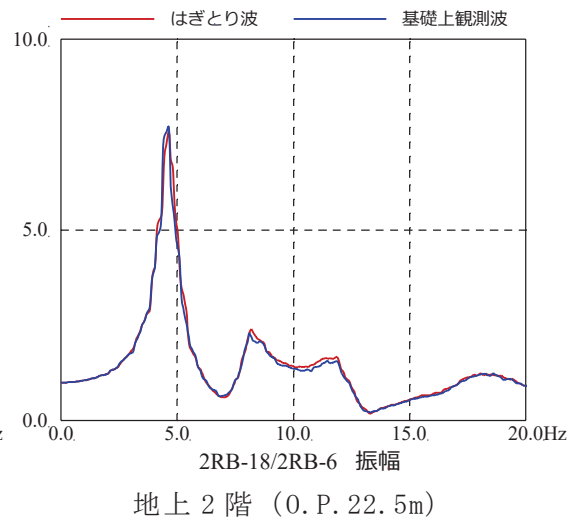
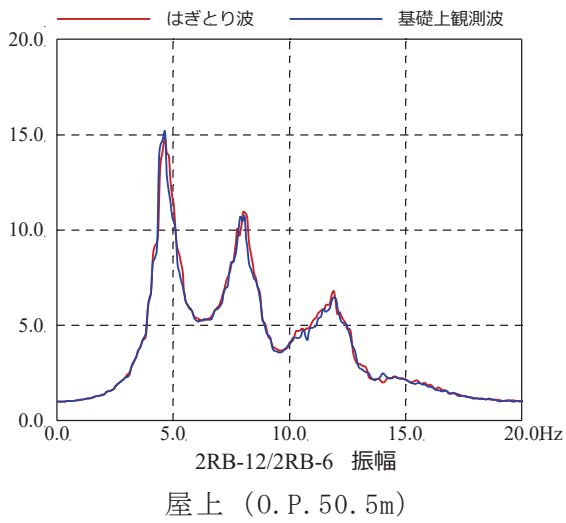


図 4-35(2) 床応答波形の伝達関数 (EW 方向)

注：地震計位置は、付録 1 参照

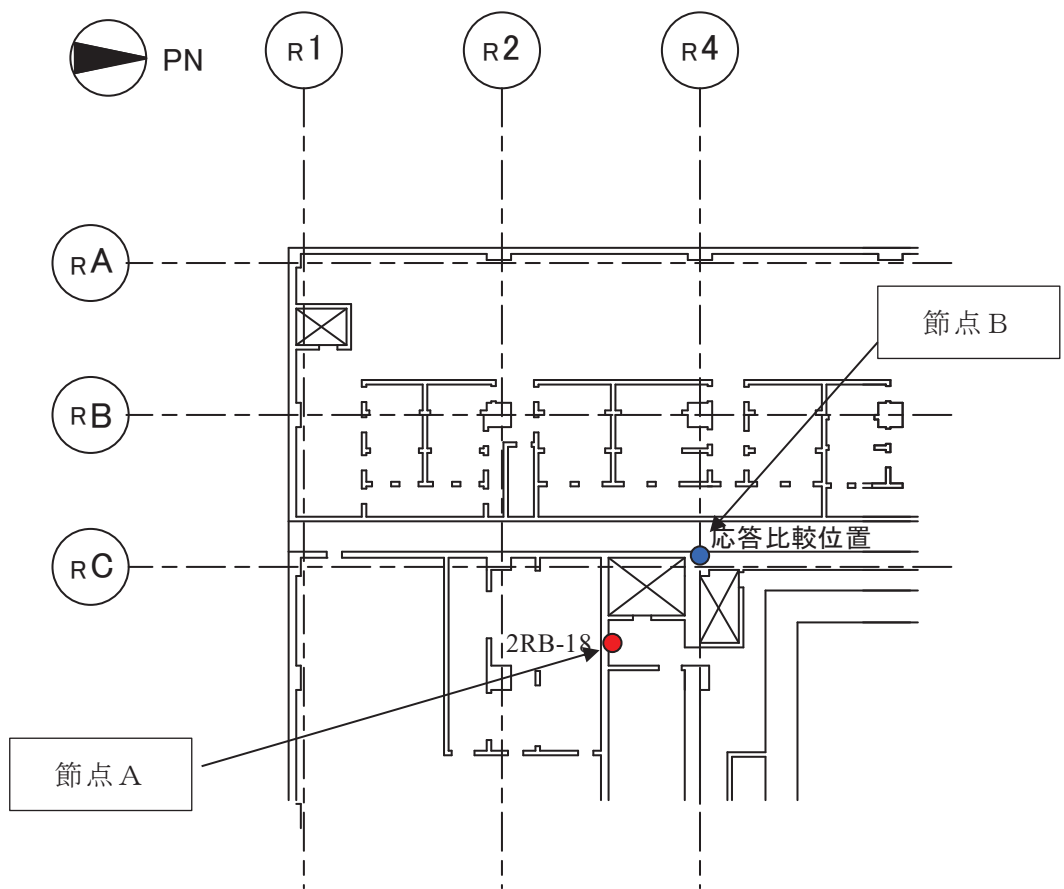


図 4-36(1) 地震計設置位置と応答比較位置 (原子炉建屋地上2階 (O.P. 22.5m))

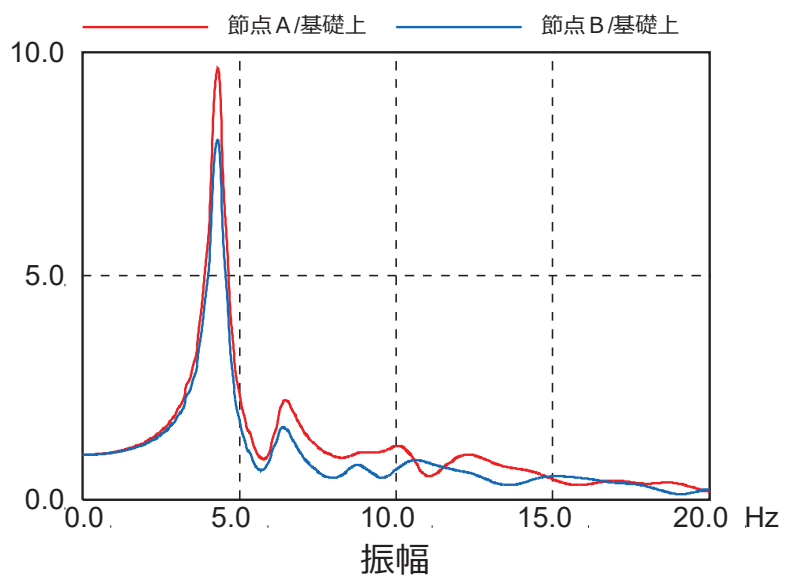


図 4-36(2) 3D-FEM モデルの伝達関数 (NS 方向)



#### 4.3.3 基準地震動 $S_s$ に対する入力地震動評価用地盤モデルの適用性

(詳細は別紙 11～14 参照)

##### (1) 検討概要

表層地盤上部の非線形特性は、地盤の物性試験結果を基に評価し 3.11 地震等の様々な記録を用い、手法の妥当性の検証を行っている。しかし、基準地震動  $S_s$  では過去の地震よりも更にひずみが進んだ状態となる（外挿関係になる）ことから、ここでは、基準地震動  $S_s$  に対する各種感度解析を実施し、それらの影響について確認する。

また、既往プラントでは、入力地震動評価に逐次非線形解析を採用した実績が無いことも踏まえ、評価手法の設定条件等の違いが基準地震動  $S_s$  の応答に与える影響について感度解析を実施し、その影響について確認する。

##### (2) 検討方法

基準地震動  $S_s$  について、地盤モデルの表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  の違い、表層地盤上部の非線形特性の評価方法の違いが応答結果に与える影響を確認する。

具体的には、①表層地盤下部のせん断波速度を低下させた場合の影響、②表層地盤上部の初期物性に地盤の安定性解析と同様の評価を採用した場合の影響について検討した。

また、地盤減衰モデルの違い、地盤モデルの下端深さの違いが応答結果に与える影響を確認する。

具体的には、③地盤減衰モデル（レーリー減衰）を内部粘性減衰に変えた場合の影響検討、④引き下げモデルの下端深さの違いの影響について検討した。

##### (3) 検討結果

まず、①表層地盤下部のせん断波速度を変化させた場合の検討結果を図 4-37 に示す。

表層地盤下部の波動伝播特性評価においては、岩盤以外の地質構造もあるものの全体として岩盤の影響が支配的な層として設定しており、せん断波速度は岩盤相当の値（900m/s）を採用し特に非線形性は考慮していないが、岩盤以外の表層地盤の非線形化の影響の可能性も考慮し、地盤物性の変化（S波速度値を 800m/s から 1000m/s の範囲で変化）が基準地震動  $S_s$  の応答に与える影響を確認した。その結果、表層地盤下部の地盤物性の違いが応答結果に与える影響は小さいことが確認された。この傾向は 3.11 地震に対しても同様となっていることも合わせて確認した。これらから、表層地盤下部の  $V_s=900\text{m/s}$  を採用することとした。

次に、②表層地盤上部の初期物性を地盤の安定性解析と同様の評価を採用した場合の検討結果を図4-38に示す。

表層地盤の非線形特性は、PS 検層結果から初期せん断剛性 $G_0$ を、原位置せん断試験結果から双曲線モデルとして $G/G_0-\gamma$  曲線を、繰返し三軸試験結果から $h-\gamma$  曲線を設定し、地震観測記録のシミュレーション解析により検証している。一方、初期せん断剛性 $G_0$ 及び $G/G_0-\gamma$  曲線については、地盤安定解析では繰返し三軸試験による結果も考慮していることから、この結果を反映した地盤モデルを採用した場合の3.11地震に対するシミュレーション解析を行い、観測記録との整合性について検討した。その結果、現状評価の方が整合性の良い結果となった。更に、地盤モデルの違いが基準地震動 $S_s$ の応答に与える影響についても確認したところ、ひずみの大きい基準地震動 $S_s$ の場合、両者の違いは小さいことを確認した。これらから、表層地盤上部の非線形特性は現状評価が妥当と判断した。

次に、③地盤減衰モデル（レーリー減衰）を内部粘性減衰に変えた場合の検討結果を図4-39に示す。

逐次非線形解析では、減衰モデルは内部粘性減衰又はレーリー減衰が適用できるが、3.11地震のシミュレーション解析ではレーリー減衰（3%）を採用し観測記録との整合性が確認されたため、基準地震動 $S_s$ の入力地震動算定においてもレーリー減衰を採用している。レーリー減衰は2つの固有振動数に対し減衰が設定可能だが、内部粘性減衰は一つの固有振動数に減衰を設定するとそれより高次は減衰が大きく評価されることから、レーリー減衰の方が表層地盤の反射波（F波）の高振動数側については大きく算定する結果を与える。参考にレーリー減衰と内部粘性減衰の違いが基準地震動 $S_s$ に対する応答に及ぼす影響を比較すると、短周期側でレーリー減衰の方が入力地震動を大きめに評価する結果となっている。

最後に、④地盤モデルの下端深さの違いの検討結果を図4-40に示す。

入力地震動の評価の際には、建屋基礎底面レベルに設定した解放基盤表面の地震動（2E波）から地盤モデルの下端における地震動（2E<sub>0</sub>波）を算定し、表層地盤を考慮した地盤モデルに算定した地震動を入力して建屋基礎底面レベルの入力地震動（E+F波）を算定している。算定にあたっては、下降計算、上昇計算とも基本的には同じ次元波動論を採用していることから、地盤モデルの下端深さの違いが解析結果に与える影響は大きいものではないと考えられること、また、地震基盤相当レベル（O.P. -128.4m）よりも上部の波動伝播特性については観測記録との整合性が確認されていることを考慮し、地盤モデルの下端深さは地震基盤の地盤物性が更に深部に延長するモデルとしてO.P. -200mに設定している。

また、3.11地震に対するシミュレーション解析においても地盤モデルの下端深さはO.P. -200mとしており、記録との整合性が確認されている。

ここでは、地盤モデルの下端深さの違いが解析結果に与える影響について基準地震動を用いて評価した。その結果、地盤モデルの下端深さの違いが応答結果に与える影響は小さいことを確認した。この結果を踏まえても、地盤モデルの下端深さを O.P. -200m に設定することは妥当と判断した。なお、図 4-40 において地盤モデルの下端深さを O.P. -400m に設定したモデルの短周期側の応答スペクトルの値のほうが小さくなる傾向が見られるが、これは、地盤モデルの下端深さが深くなるほどレーリー減衰モデルの短周期側の減衰が大きくなることの影響が顕著に表れるためであると考えられる。

以上より、表層地盤下部の物性の違いの感度は小さいこと、また、上部については非線形レベルの大きい基準地震動  $S_s$  ではあまり違いが生じないことを確認した。地盤減衰モデルでは 3.11 地震シミュレーションに用いた手法が保守的な結果を与えることを、地盤モデル下端深さの違いについては感度が小さいことを確認した。

以上のことから、設定した入力地震動評価用地盤モデルは基準地震動  $S_s$  に対する評価に適用可能と判断した。

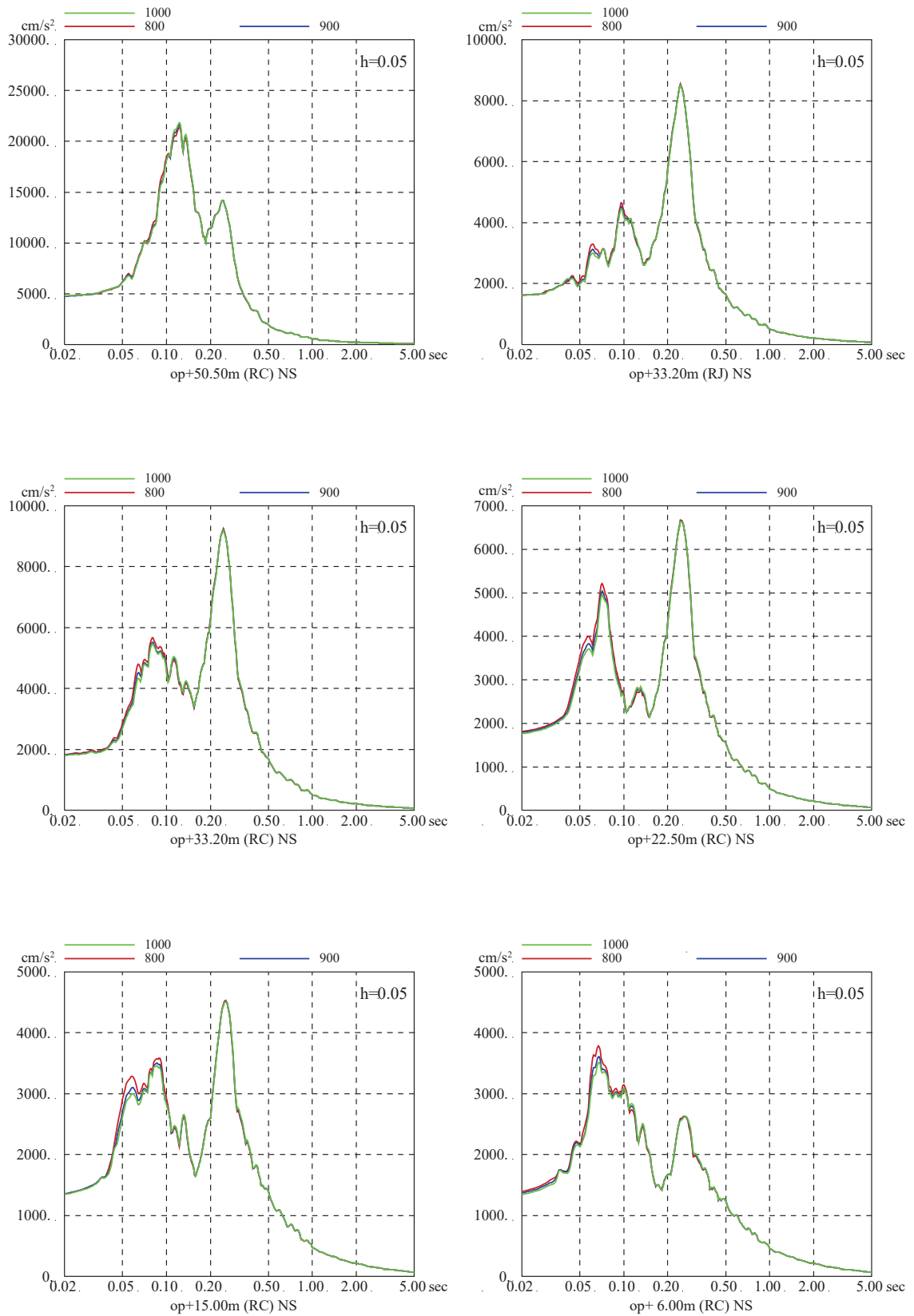


図 4-37(1) 表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を変化させた場合の床応答スペクトルの比較 ( $V_s=800\text{m/s}\sim 1000\text{m/s}$ , 基準地震動  $S_s - D2$ , NS 方向)

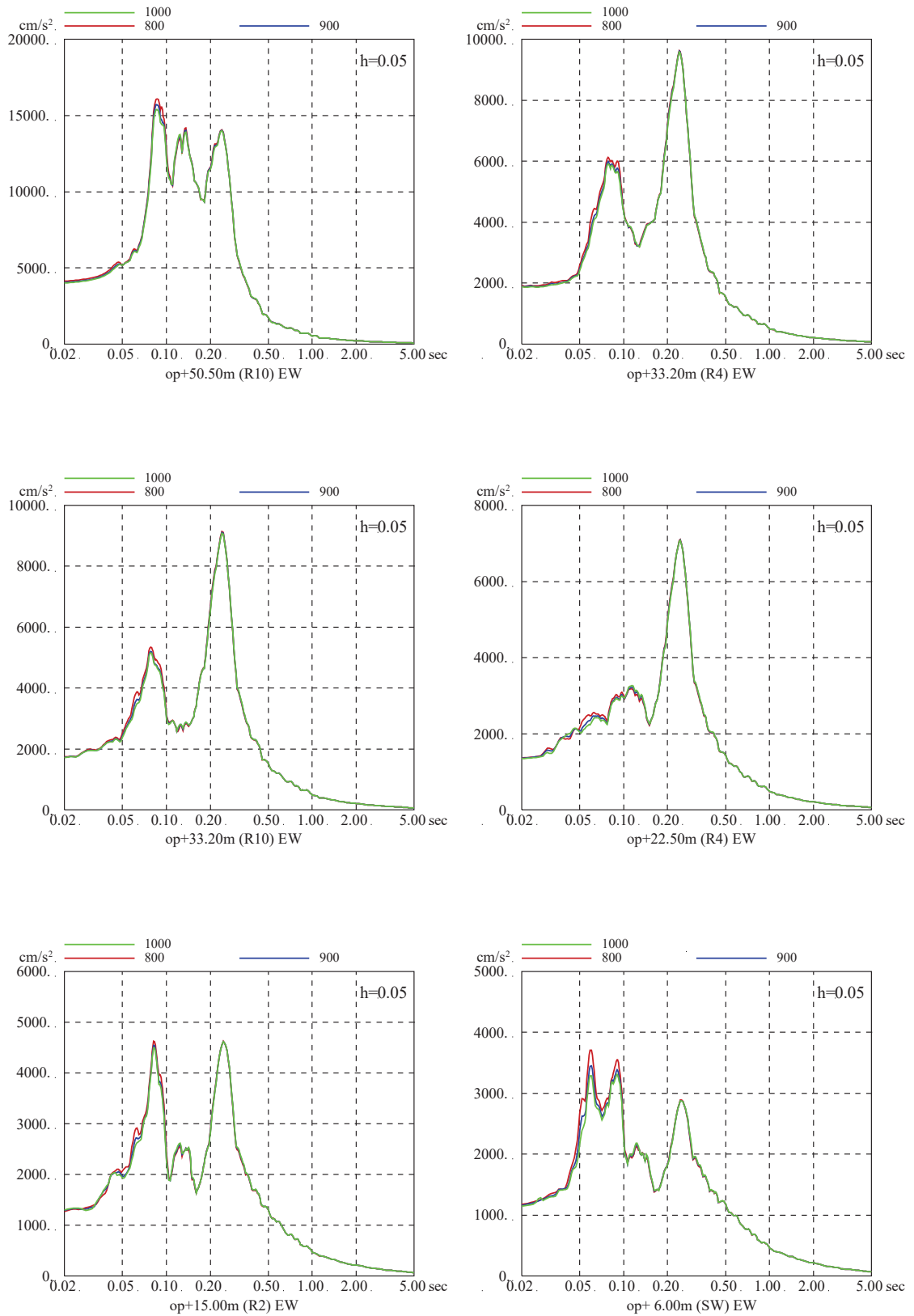


図 4-37(2) 表層地盤下部のせん断波速度  $V_s$  を変化させた場合の床応答スペクトルの比較 ( $V_s=800\text{m/s}\sim 1000\text{m/s}$ , 基準地震動  $S_s-D2$ , EW 方向)

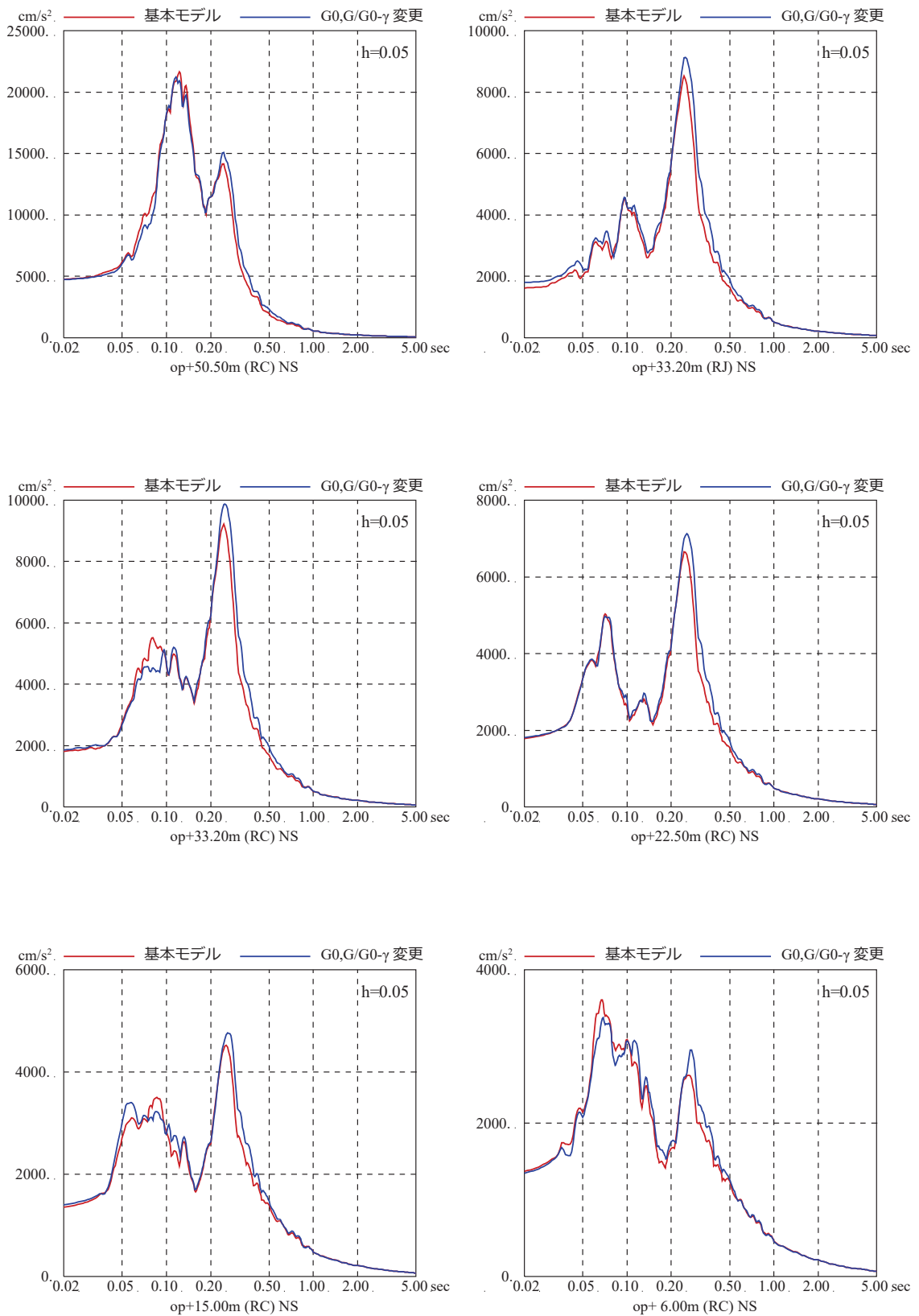


図 4-38(1) 表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の  
床応答スペクトルの比較 (基準地震動  $S_s - D2$ , NS 方向)

注: 凡例の「 $G_0, G/G_0 - \gamma$  変更」は、地盤安定解析と同様に繰返し三軸試験による結果も考慮した解析結果を示す。

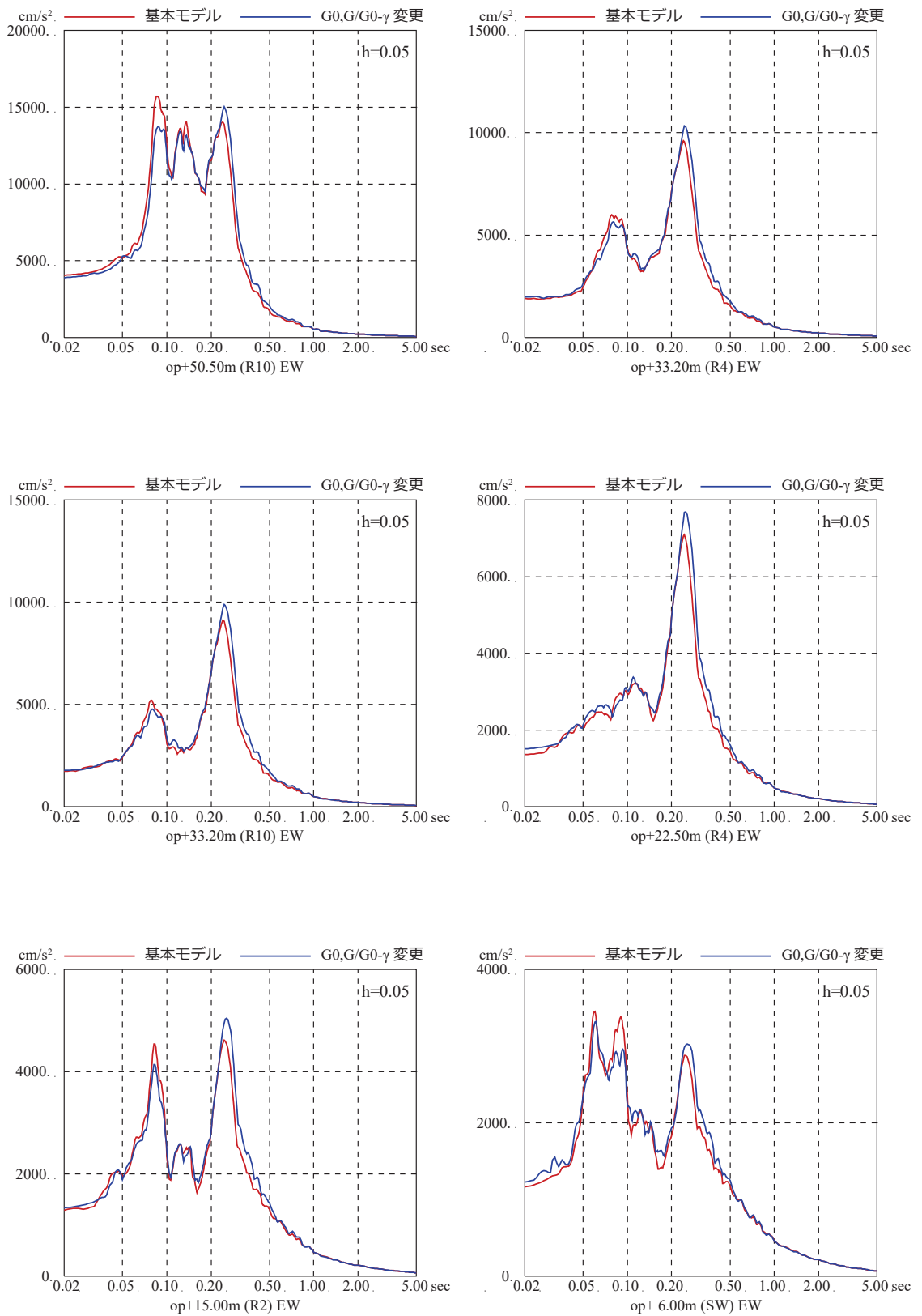


図 4-38(2) 表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の  
床応答スペクトルの比較 (基準地震動  $S_s - D2$ , EW 方向)

注: 凡例の「 $G_0, G/G_0 - \gamma$  変更」は, 地盤安定解析と同様に繰返し三軸試験による結果も考慮した解析結果を示す。



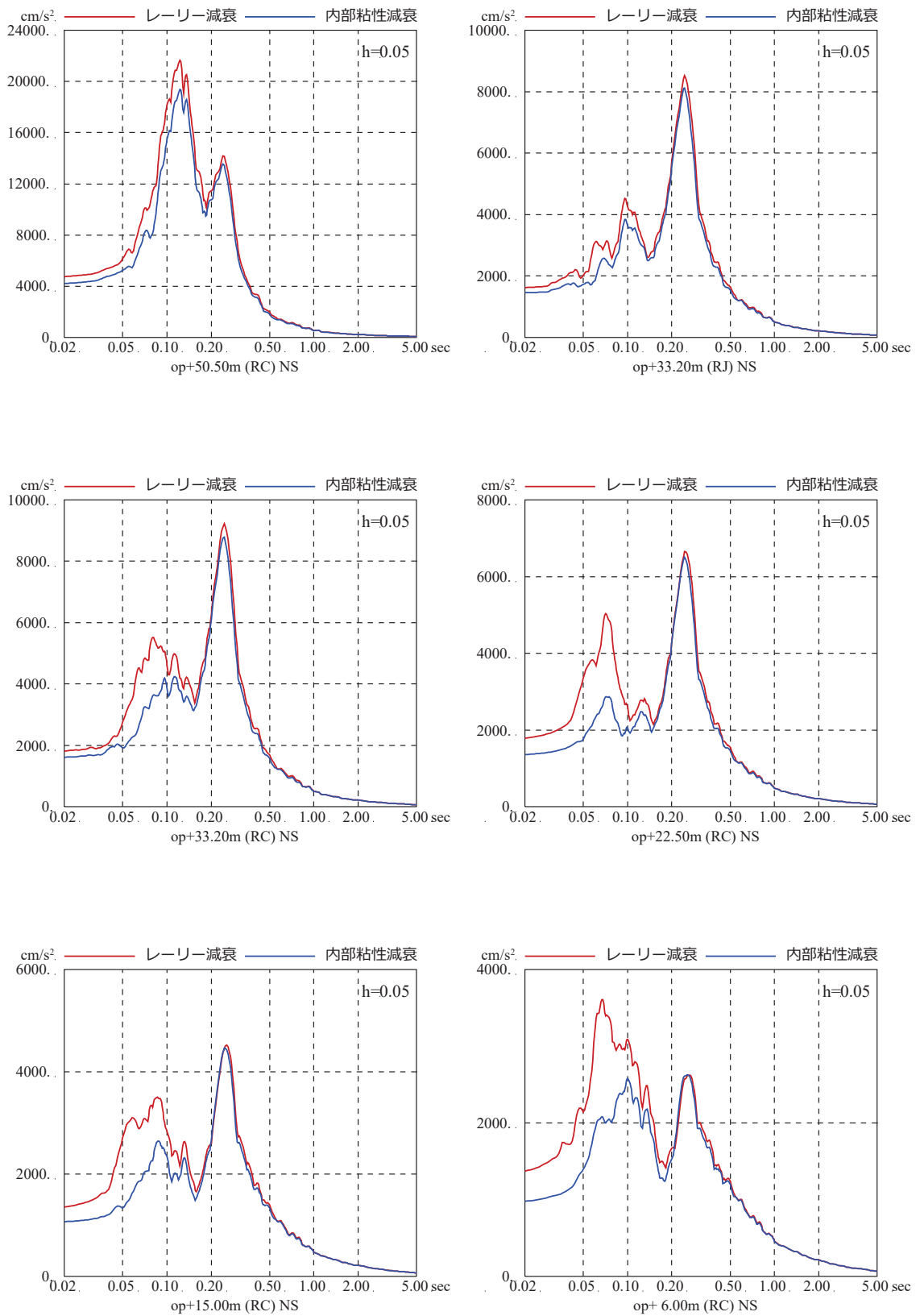


図 4-39(1) 減衰モデルの異なる地盤モデルによる  
原子炉建屋の床応答スペクトルの比較 (基準地震動  $S_s - D2$ , NS 方向)

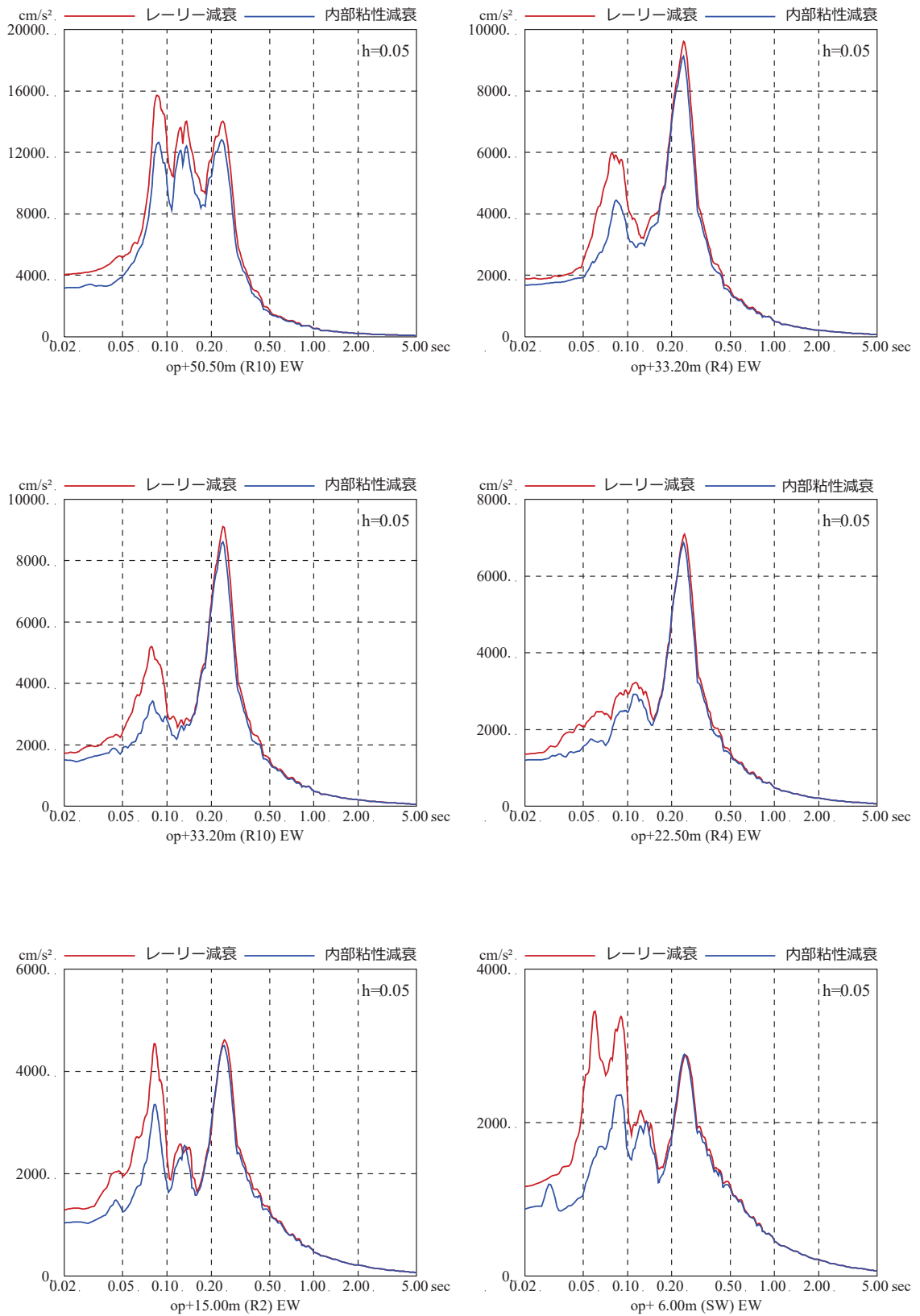


図 4-39(2) 減衰モデルの異なる地盤モデルによる  
原子炉建屋の床応答スペクトルの比較 (基準地震動 S<sub>s</sub>-D2, EW 方向)

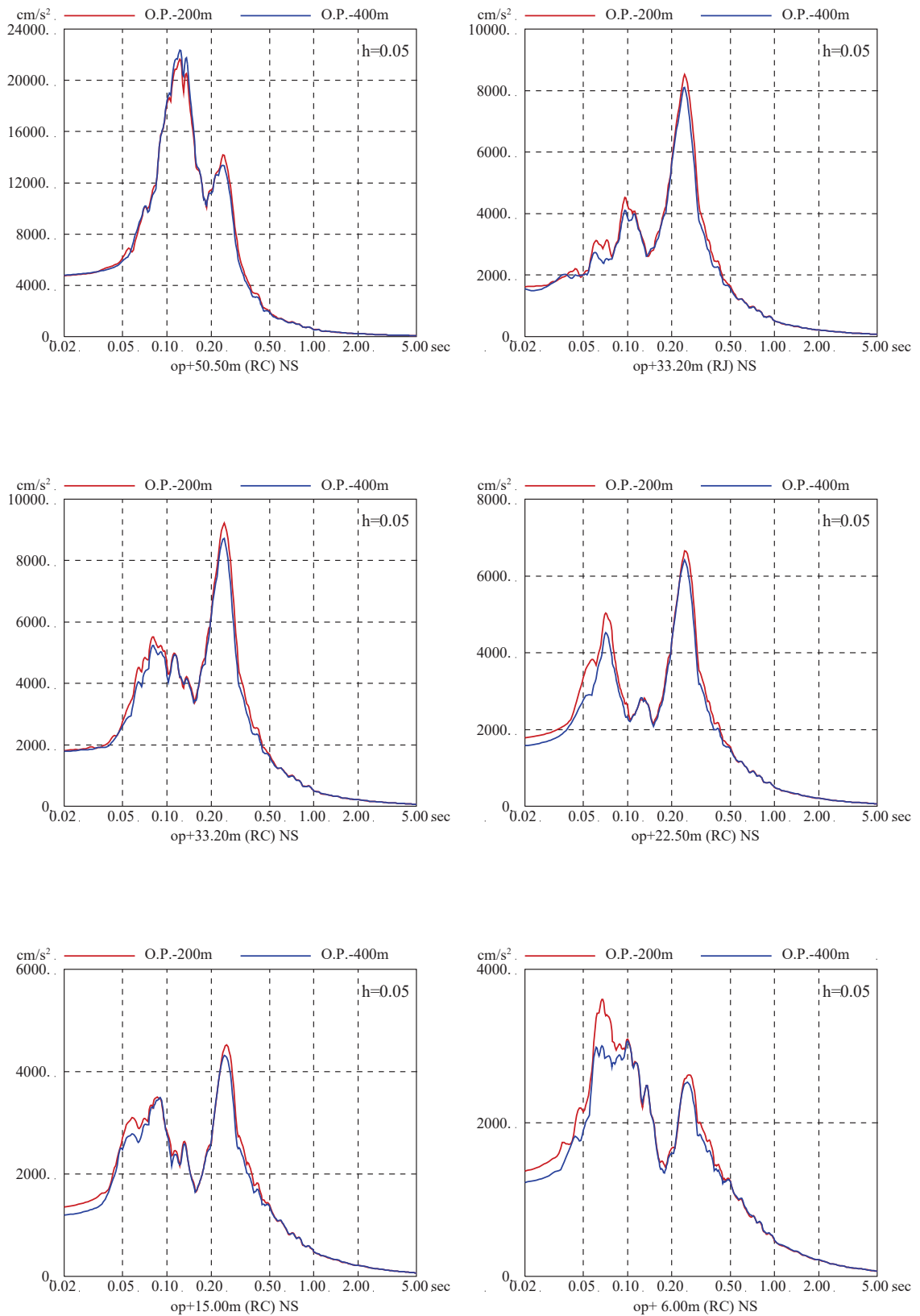


図 4-40(1) 地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較  
(地盤モデルの下端深さ O.P.-400m の比較, 基準地震動  $S_s - D2$ , NS 方向)

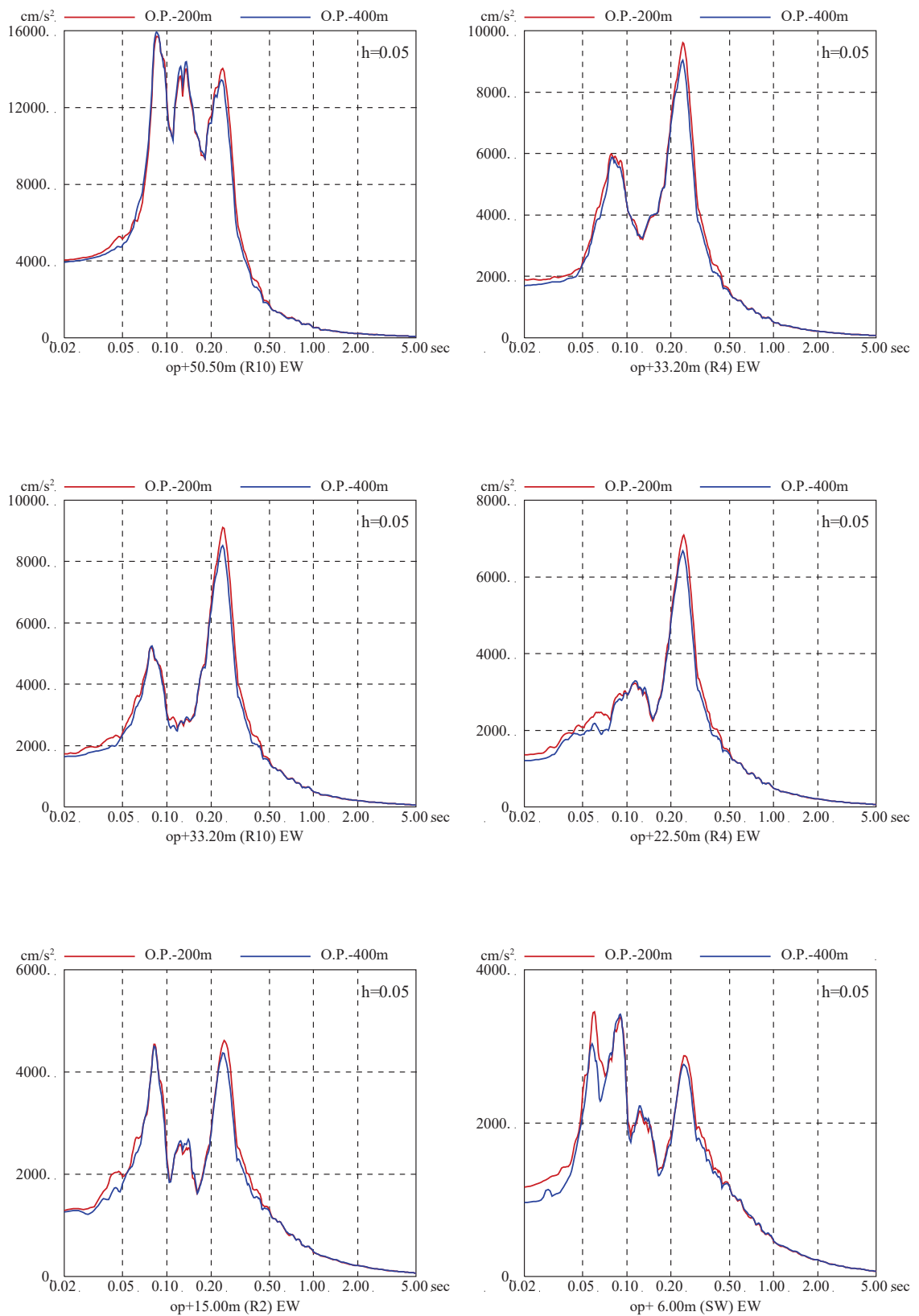


図 4-40(2) 地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較  
(地盤モデルの下端深さ O.P.-400m の比較, 基準地震動  $S_s - D2$ , EW 方向)

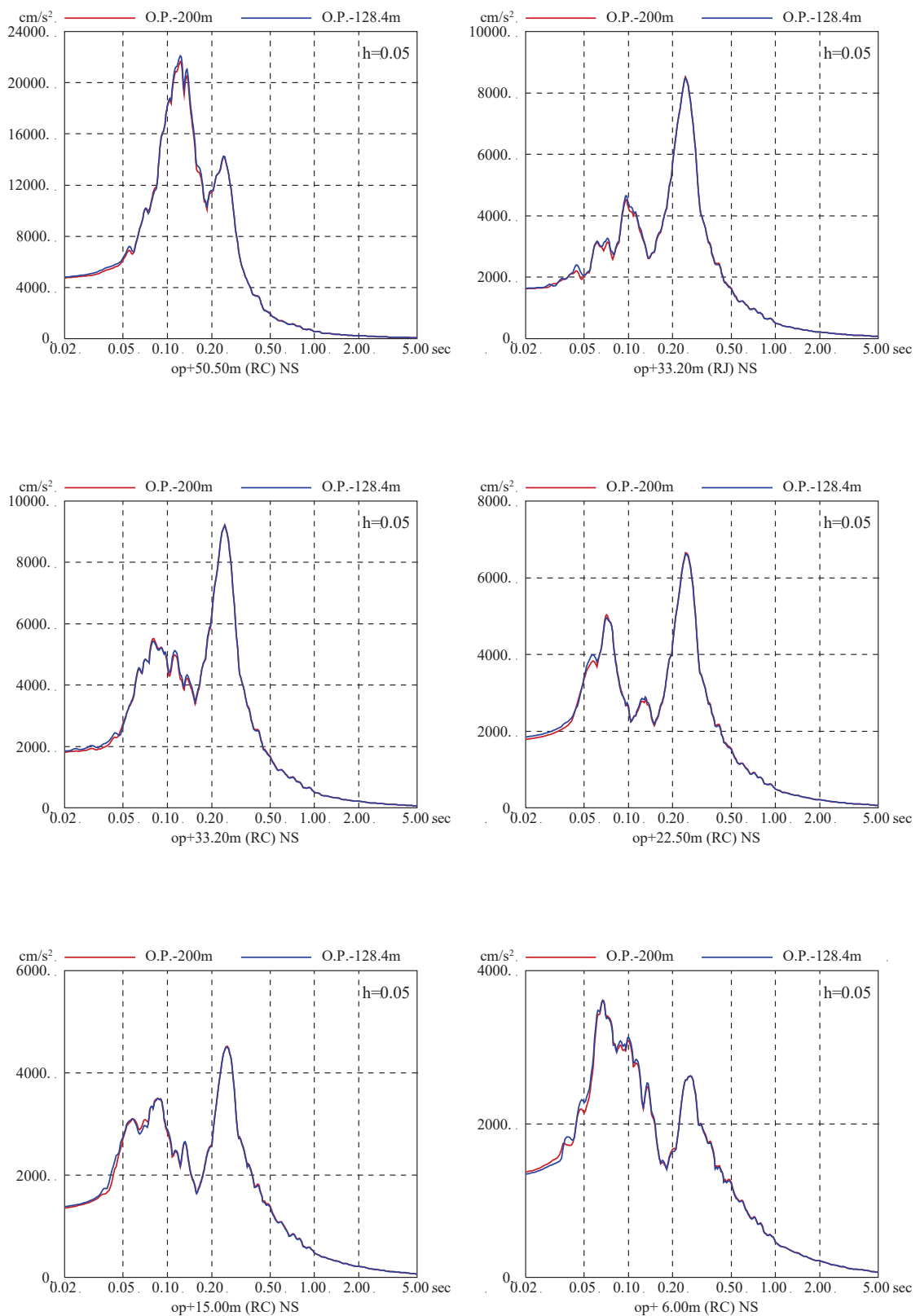


図 4-40(3) 地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較  
 (地盤モデルの下端深さ O.P.-128.4m の比較, 基準地震動 S s - D 2, NS 方向)

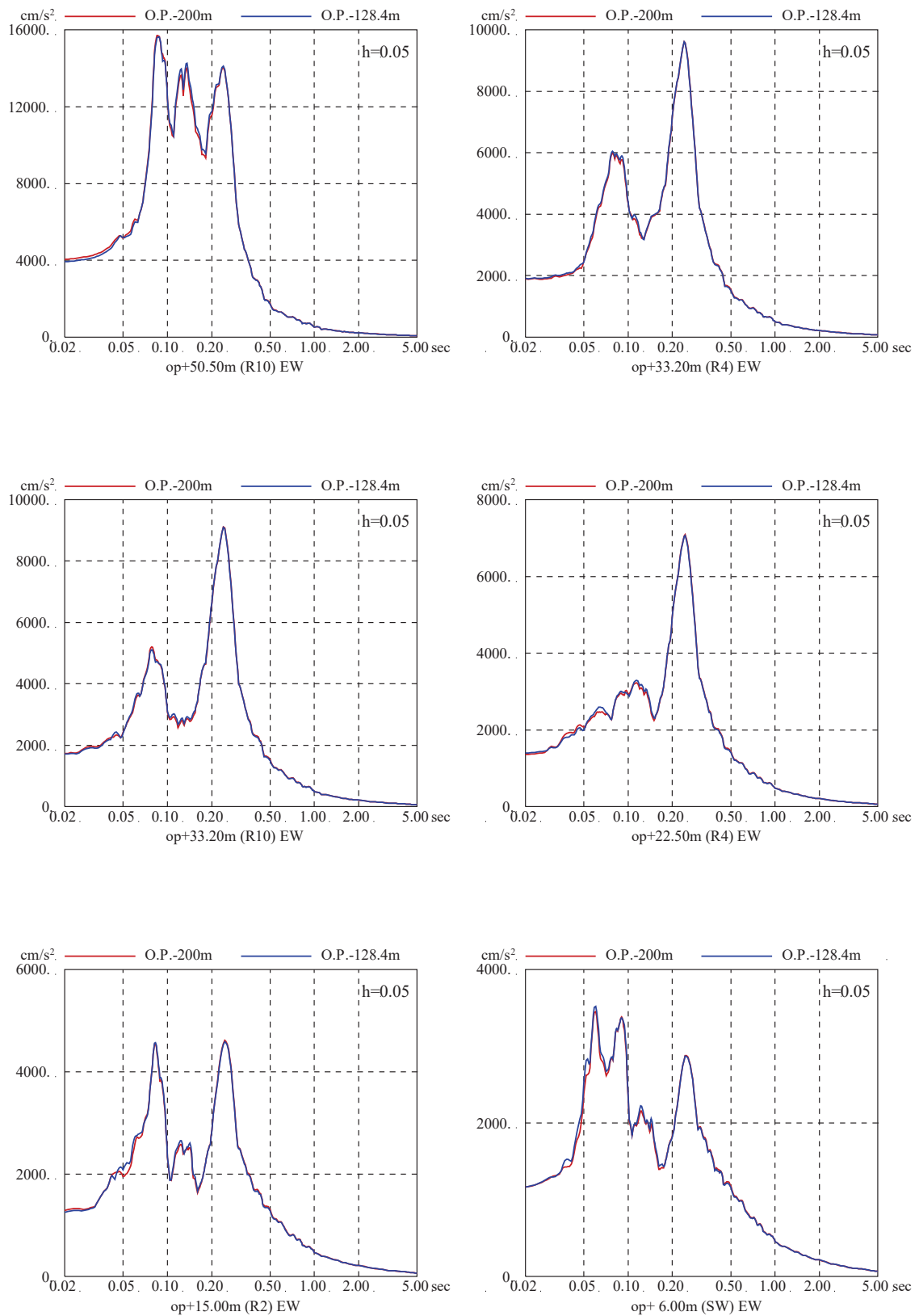


図 4-40(4) 地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較  
(地盤モデルの下端深さ O.P.-128.4m の比較, 基準地震動 S s - D 2, EW 方向)

4.3.4 表層地盤の影響を考慮した入力地震動評価が建屋応答へ与える影響（原子炉建屋）  
（詳細は別紙17参照）

(1) 検討目的

原子炉建屋の今回工認では、建屋への入力地震動を表層地盤の影響を考慮して評価する E+F 入力としている。

ここでは、基準地震動  $S_s$  を建屋へ直接入力した場合 (2E 入力) との建屋応答の差異を確認する。

(2) 検討方法

検討は、基準地震動  $S_s - D2$  を原子炉建屋の解析モデルに直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した建屋基礎版底面レベルの地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋の解析結果を比較すること及び機器・配管系評価への影響を確認することにより行う。

検討に用いた地盤モデルは、4.3.2 において示したモデルとする。検討概要を図 4-41 に、解析条件を表 4-13 に示す。

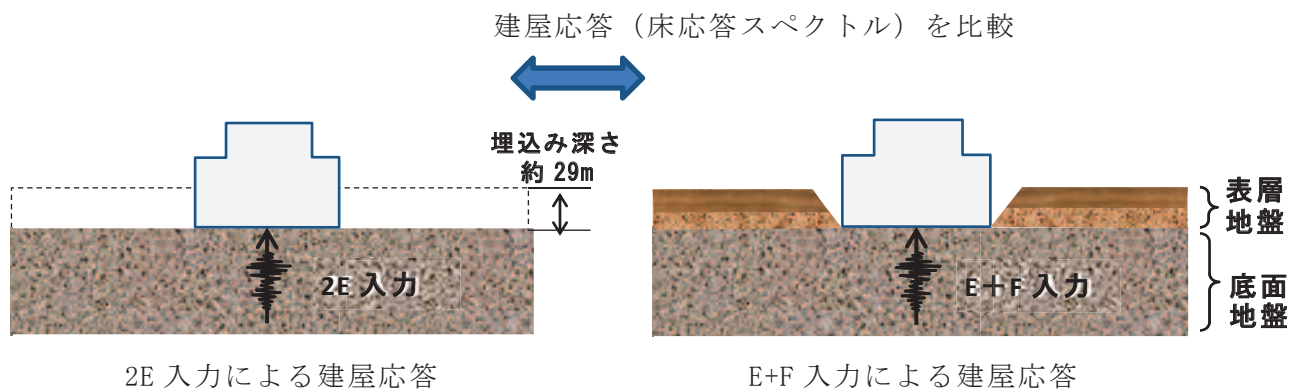


図 4-41 検討概要

表 4-13 解析条件

	2E 入力したケース	E+F 入力したケース
建屋	原子炉建屋	
地震動	基準地震動 $S_s - D2$	
入力地震動	直接入力 (2E 入力)	基礎版底面レベルの地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 耐震補強考慮, 建屋減衰 5%, 側面地盤ばね無し)	
地盤モデル	入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	



(3) 検討結果

基準地震動  $S_s - D2$  を原子炉建屋の解析モデルに直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した建屋基礎版底面レベルの地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋の解析結果の比較を 図 4-42 ~ 図 4-45 に示す。

検討の結果、建屋各階の床応答スペクトルは、基準地震動  $S_s$  を直接入力した場合 (2E 入力) より表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の応答値は、小さくなる傾向があり、短周期においてその傾向が顕著に見られる結果となっている。

また、機器・配管系評価への影響については、 図 4-46、 図 4-47 に示すとおり機器・配管系評価へ影響の大きい  $S_s - D2$  (建屋減衰 1%) について検討を行った。影響検討にあたっては、機器・配管系の固有周期を踏まえ、最大加速度の比及び床応答スペクトルの比により整理した。なお、影響検討は、E+F 入力を適用した場合を基準として、2E 入力を適用した場合との比較から、E+F 入力の応答低減の程度について概略評価した。

(i) 最大応答加速度比の最大値 (1.31) を用いた剛構造の設備に対する影響分析

2E 入力を適用した場合、床応答加速度が E+F 入力より 3 割程度大きくなることから、耐震評価における裕度は小さくなるものの、発生値が許容値を超過する設備はない見込みである。

(ii) 床応答スペクトルの応答比 (1.58) を用いた柔構造の設備に対する影響分析

高圧炉心スプレイ系配管を例に 2E 入力を適用した場合の影響を分析した。 図 4-46 及び 図 4-47 に示すとおり、高圧炉心スプレイ系の固有周期 0.098s 以下に着目して 2E 入力と E+F 入力とのスペクトルを比較すると、平均値の最大で 1.58 倍の応答比となっている。そこで、 表 4-14 に示す H26.7.2 申請時の評価結果\* (発生値 246MPa) にこの応答比を乗じて、2E 入力での発生値を試算する。

$$246\text{MPa} \times 1.58 = 389\text{MPa}$$

試算ではあるものの、発生値は許容値 324MPa を超過する見込みである。

表 4-14 高圧炉心スプレイ系配管の耐震評価結果\*

評価対象設備		評価結果			備考	
		応力分類	評価部位	発生値 (MPa)		評価基準値 (MPa)
高圧炉心スプレイ系	高圧炉心スプレイ系配管本体	一次応力	本体	246	324	
		一次+二次応力	本体	435	398	※1
	疲労評価	本体	0.176	1	単位：なし	
	高圧炉心スプレイ系配管支持構造物	スナッチ耐荷重	サポータ部材	97.1	129.4	単位：kN

(H26.7.2 申請の女川 2 号機補正工認より抜粋)  
 注記\* : H26.7.2 申請時の結果であり、適用している地震動は申請時の基準地震動  $S_s - 2$  であるが、基準地震動  $S_s - D2$  と類似したスペクトルであることから傾向は把握できている。

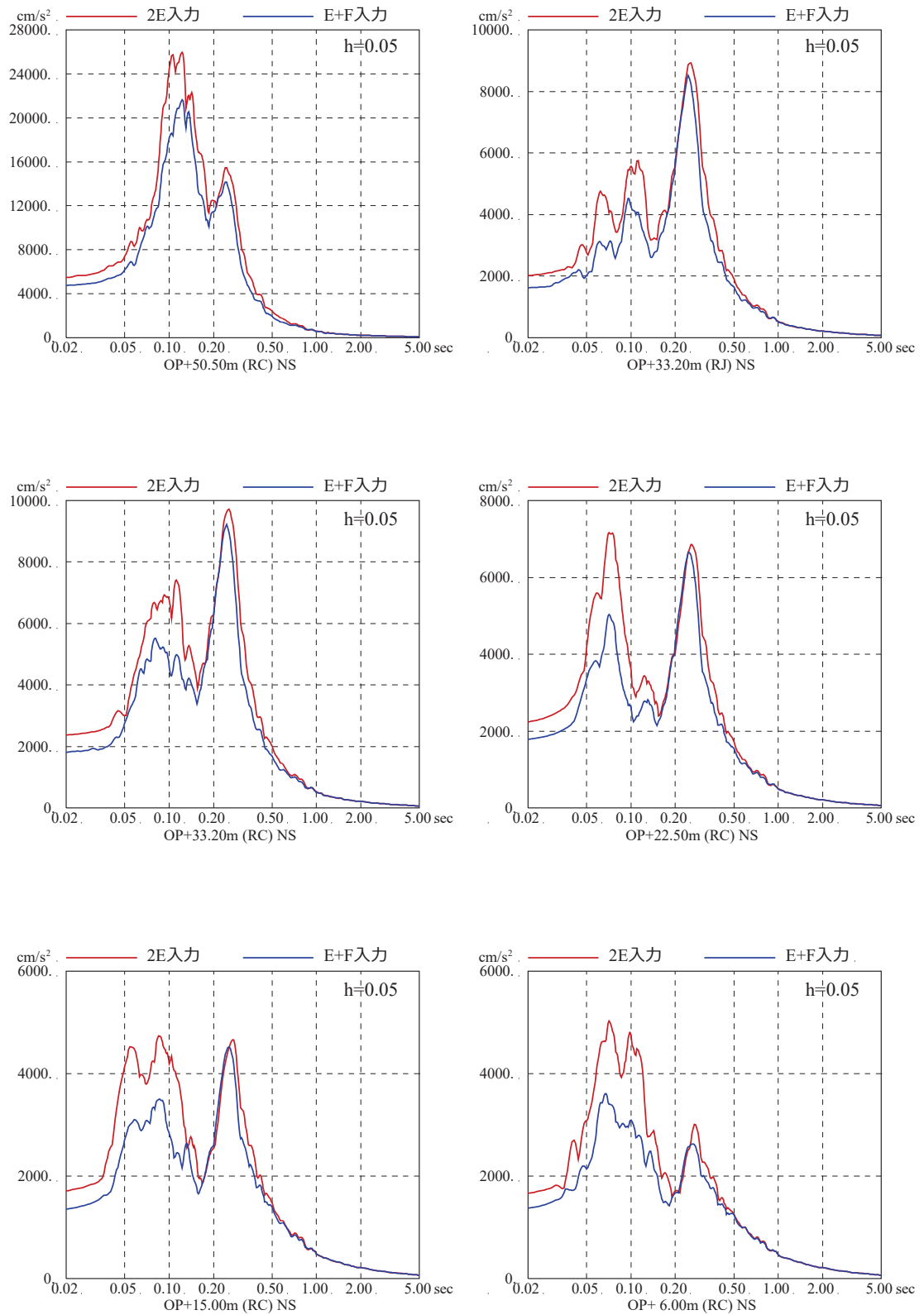


図 4-42 基準地震動 S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub> を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋応答の比較 (原子炉建屋, NS 方向, 建屋減衰 5%)

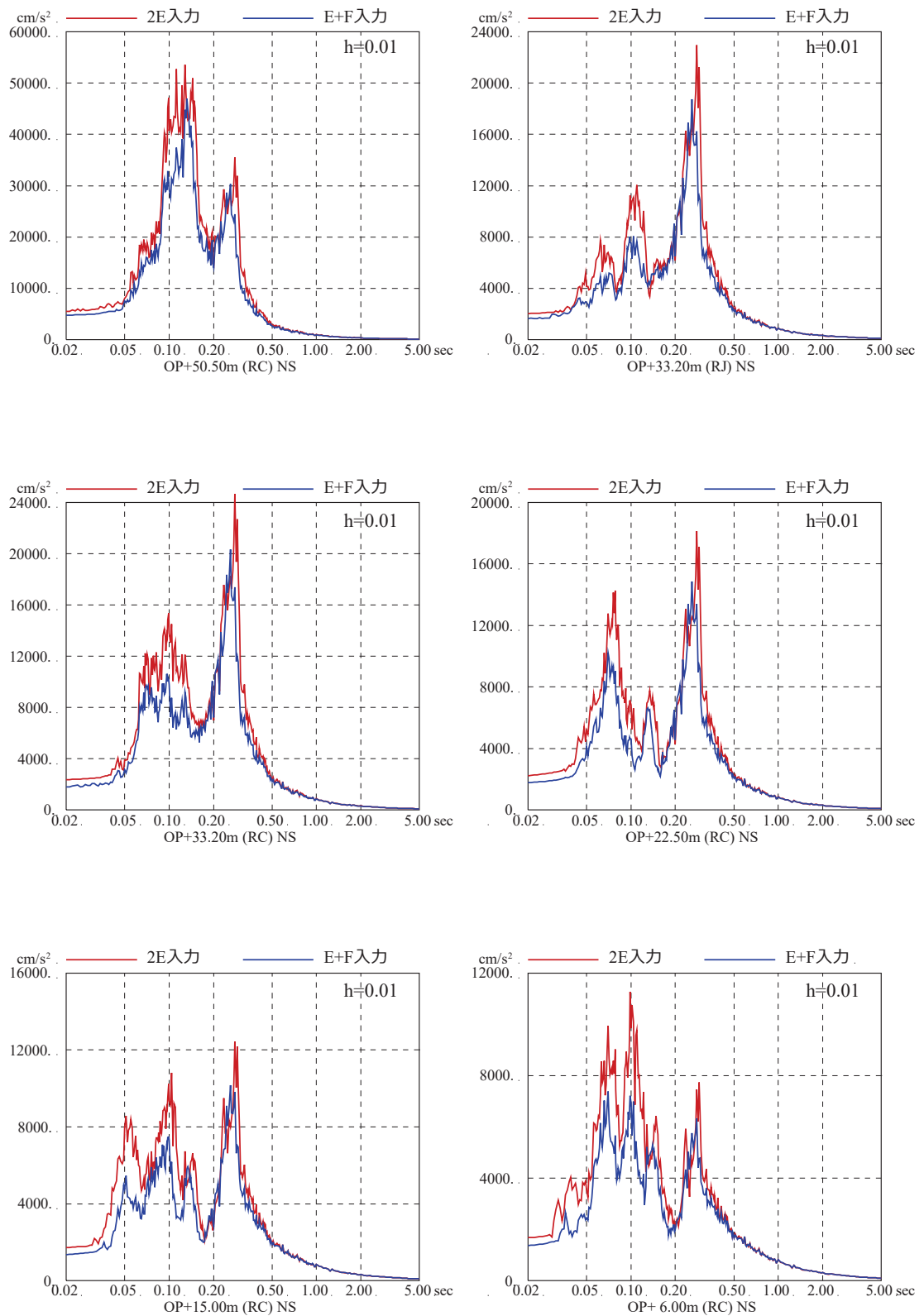


図 4-43 基準地震動  $S_s - D_2$  を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋応答の比較 (原子炉建屋, NS 方向, 建屋減衰 1%)

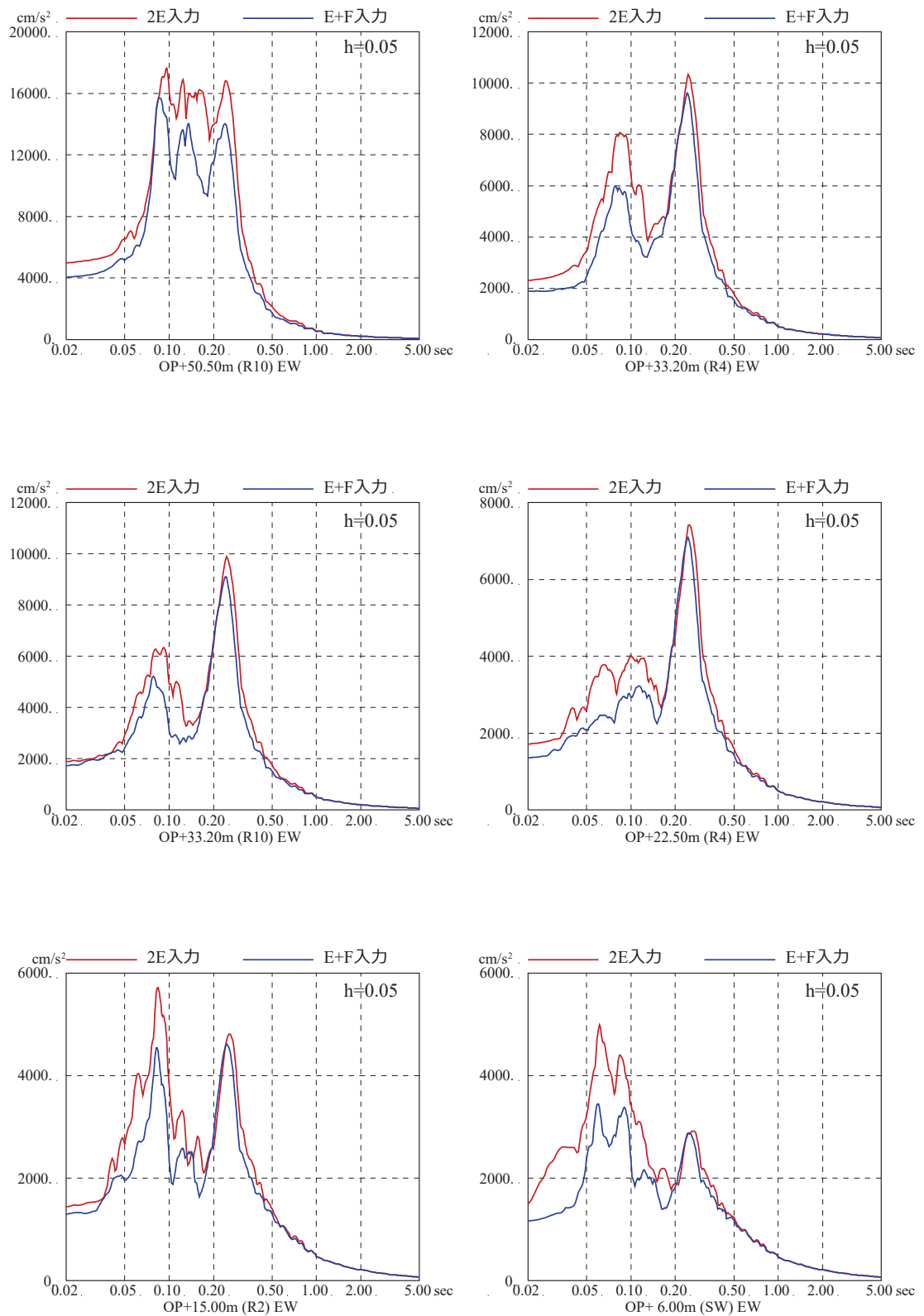


図 4-44 基準地震動  $S_s - D_2$  を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋応答の比較 (原子炉建屋, EW 方向, 建屋減衰 5%)

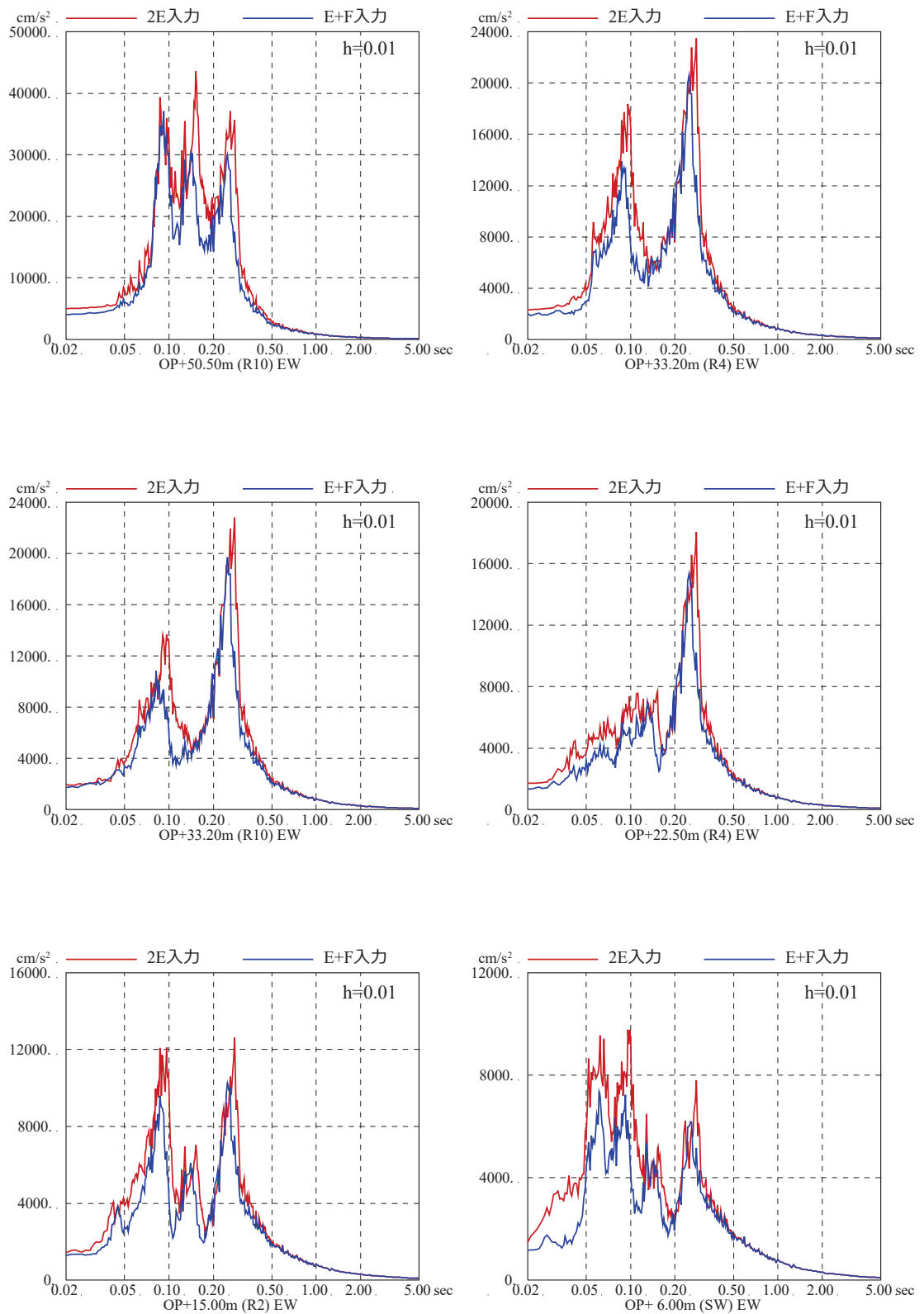


図 4-45 基準地震動  $S_s - D_2$  を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の建屋応答の比較 (原子炉建屋, EW方向, 建屋減衰1%)

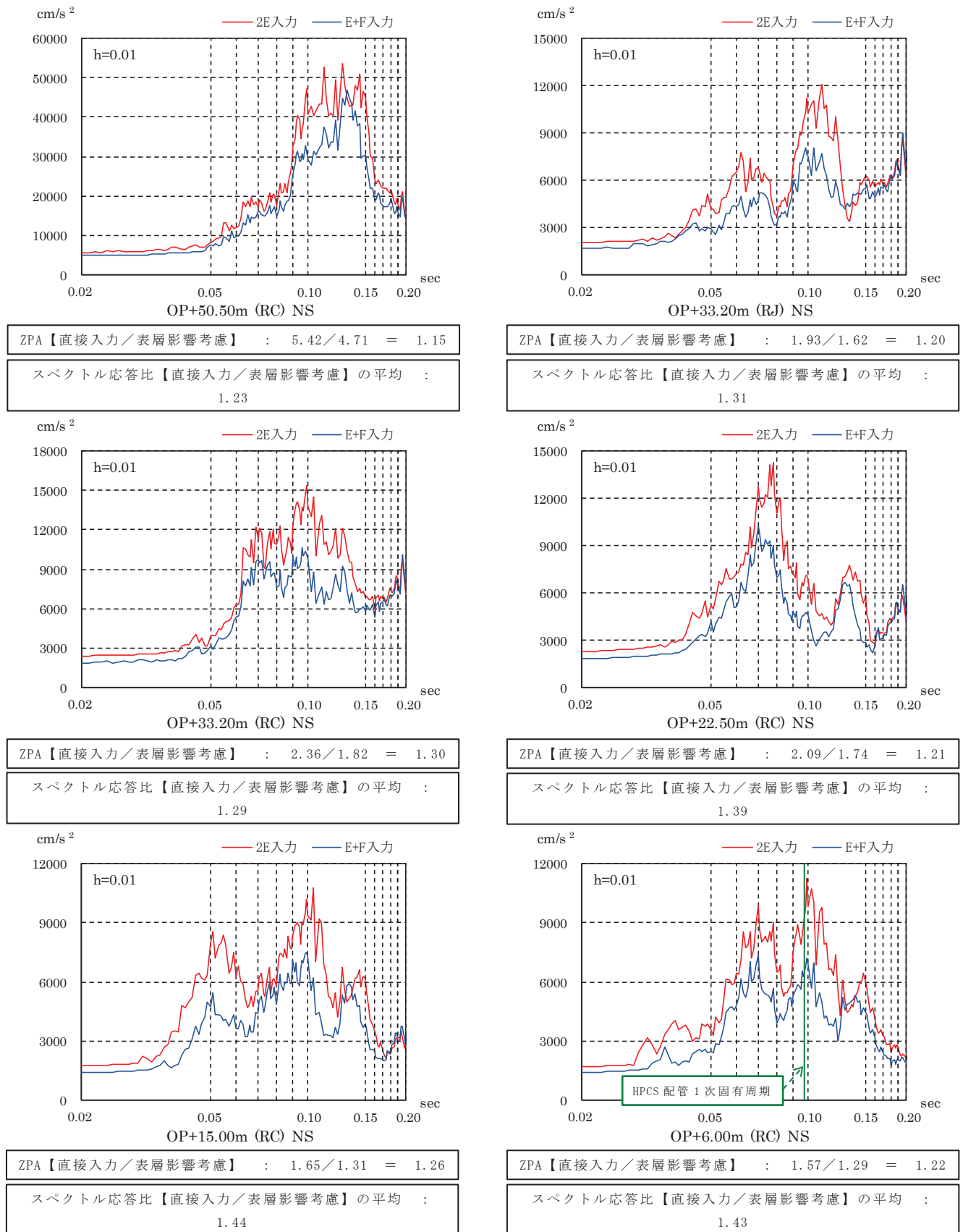
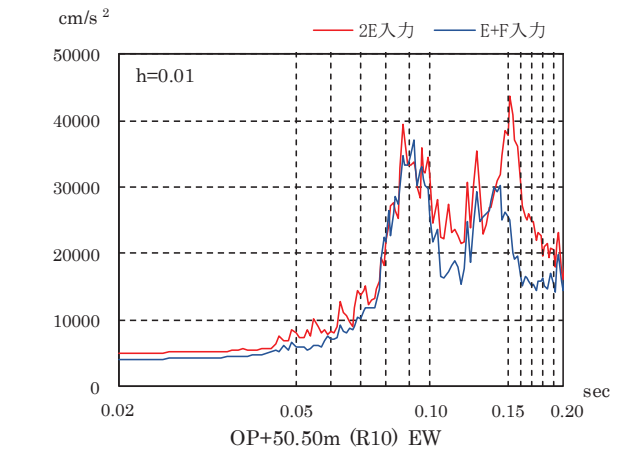
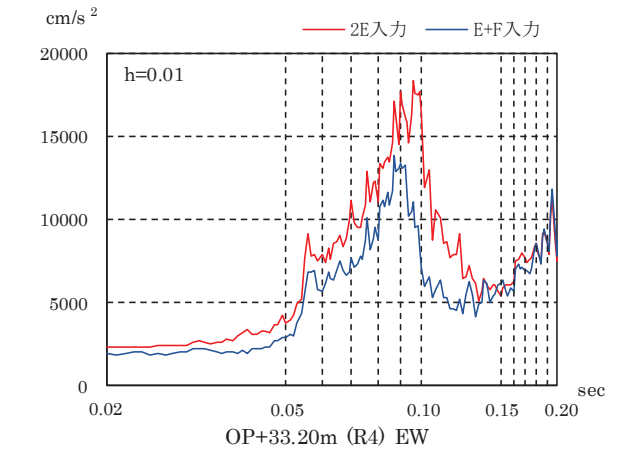


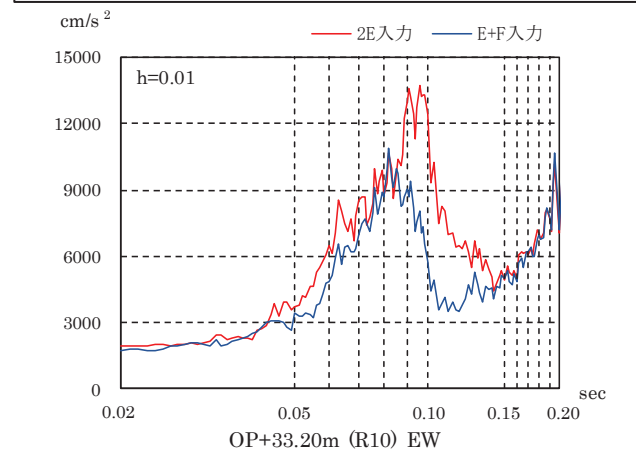
図 4-46 基準地震動 S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub> を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の機器・配管系評価の比較 (原子炉建屋, NS 方向, 建屋減衰 1%)



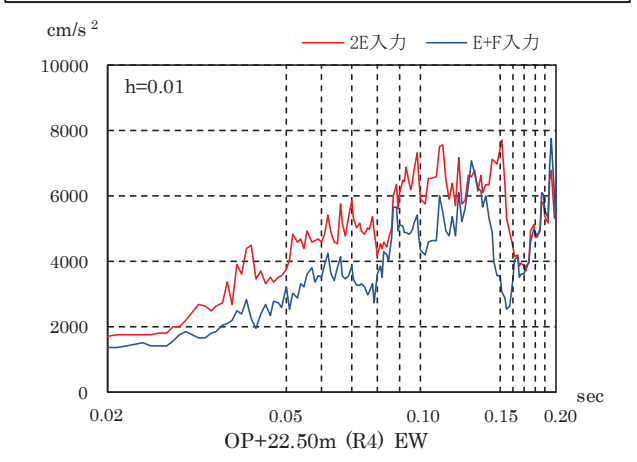
ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $4.90 / 3.98 = 1.23$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.18



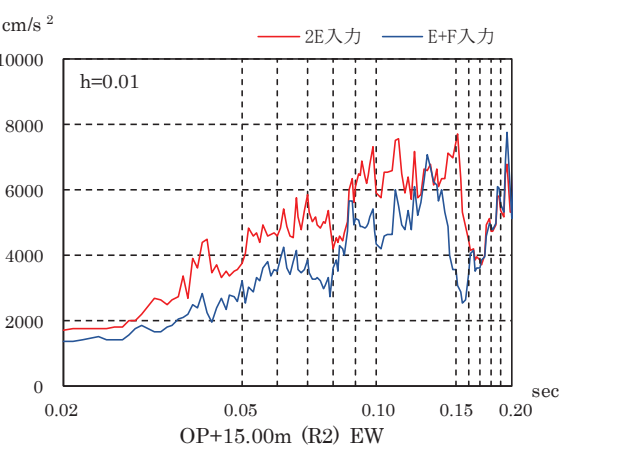
ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $2.23 / 1.80 = 1.24$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.32



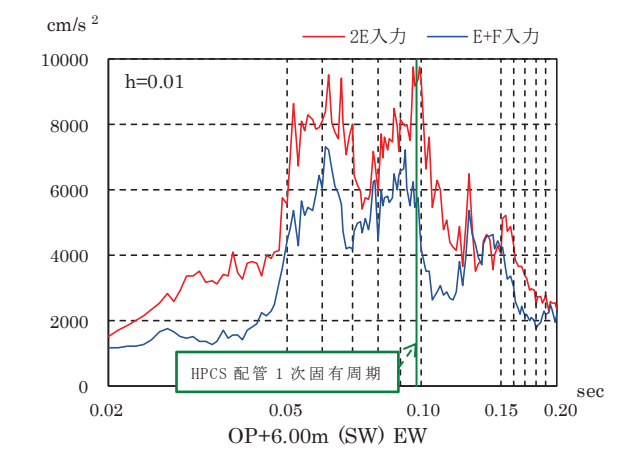
ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $1.89 / 1.74 = 1.09$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.20



ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $1.66 / 1.34 = 1.24$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.37



ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $1.42 / 1.29 = 1.10$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.33



ZPA【直接入力／表層影響考慮】 :  $1.46 / 1.12 = 1.31$   
 スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均 : 1.58

図 4-47 基準地震動  $S_s - D_2$  を直接入力した場合 (2E 入力) と表層地盤の影響を考慮して評価した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の機器・配管系評価の比較 (原子炉建屋, EW 方向, 建屋減衰 1%)

#### 4.4 埋込み効果（側面地盤ばね）に関する検討（詳細は別紙15参照）

##### (1) 検討概要

「2.2 表層地盤の特徴」で述べたように原子炉建屋の実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施している。また、3.11 地震時には、建屋のごく周辺の地盤において揺すり込みによる沈下等が確認（図 4-48）されており、強震動時にはさらに側面地盤による埋込み効果は小さいと考えられる。

一方、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」では支持岩盤と側面地盤のせん断波速度の違いが大きい場合は、側面地盤ばね（Novak ばね）の適用性について留意することとされており、硬質岩盤における Novak ばねの課題を指摘した論文もある。\*

以上を踏まえ、地盤の非線形性が大きい 3.11 地震の観測記録を用いて以下の 2 つの検討を実施する。

- ① 建屋重量の重い原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、側面地盤ばね（Novak ばね）の有無が建屋応答に与える影響や観測記録との整合性について確認する。
- ② 比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている第 3 号機海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、表層地盤が建屋応答に及ぼす影響や観測記録との整合性について確認する。

注記\*：硬質岩盤における埋込み SR モデルの適用性に関する研究 その 1～その 3，  
日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1057-1062，1995 年 8 月



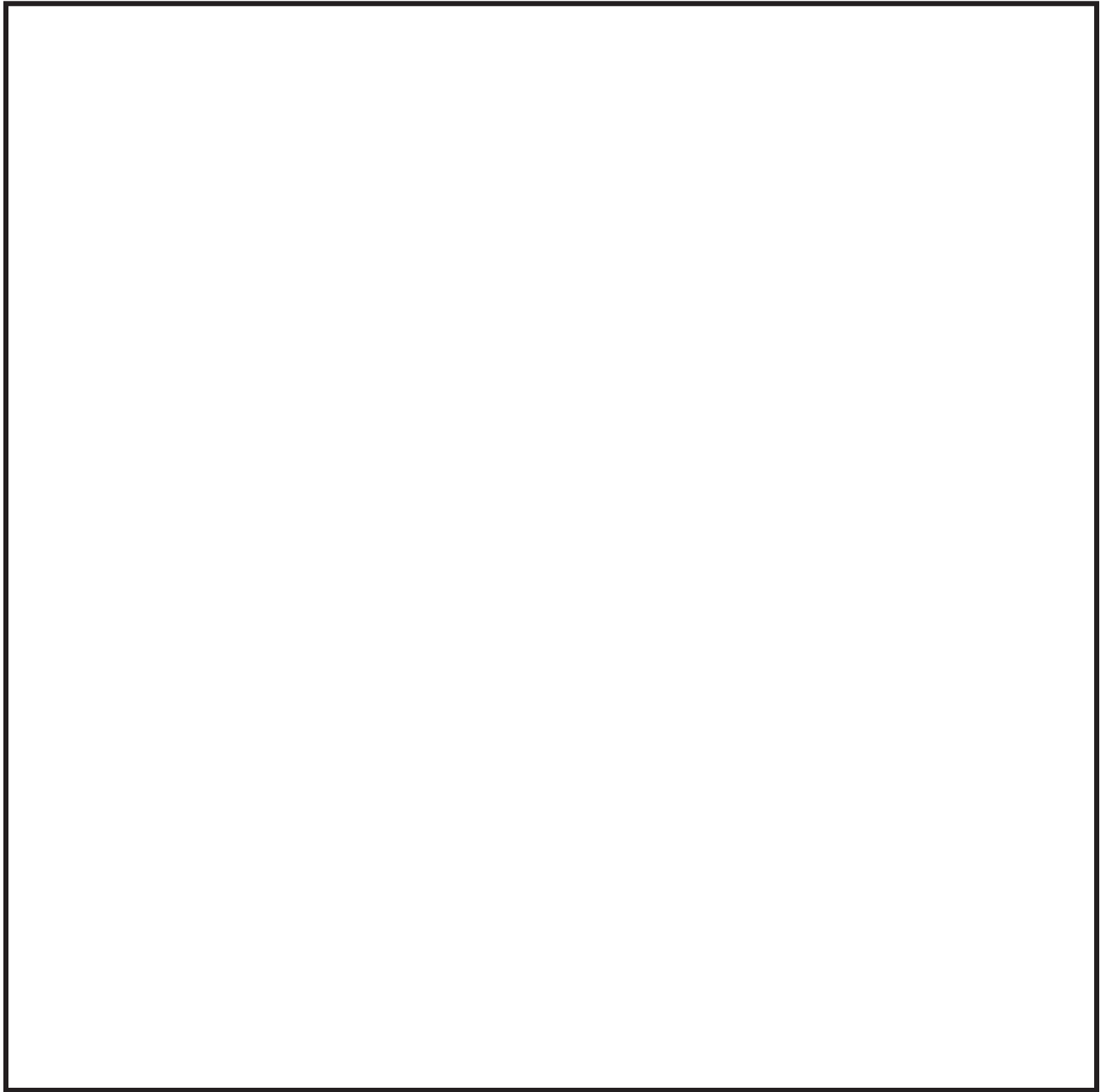


図 4-48 3.11 地震時の建屋周辺の状況

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

(2) 側面地盤ばねの有無が建屋応答に及ぼす影響検討（原子炉建屋）

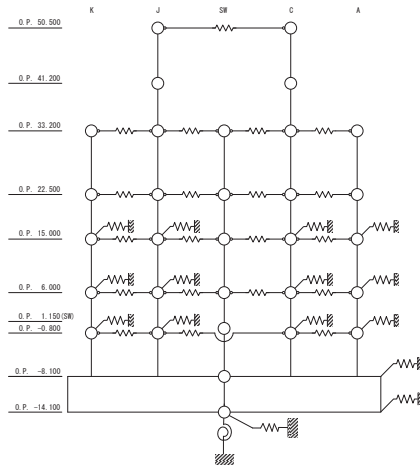
a. 検討方法

側面地盤が原子炉建屋の地震応答解析結果に及ぼす影響を確認するため、側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて、3.11地震のはざとり波によるシミュレーション解析を実施した。

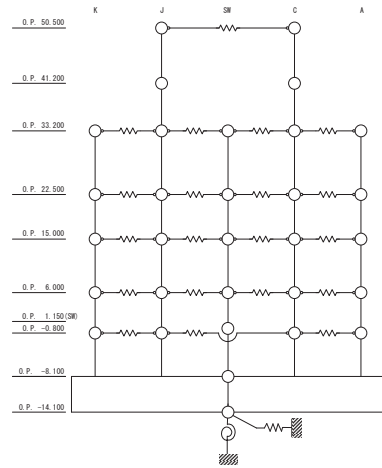
側面地盤モデルは、建屋側面の埋戻し土の断面形状が深さ方向に三角形分布をしていると仮定し、地盤を地中の質点位置ごとに、支配高さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねをNovakの方法（「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」による方法）により算定する。

側面地盤ばねの理論解  $T(\omega)$  の算定に用いる地盤定数は、埋戻し部分の形状を考慮し、表 4-15 に示す側面地盤ばねの設定に用いる埋戻し土及び等価地盤の物性値を用いる。建屋の地震応答解析モデルは、3.11地震シミュレーションモデルをベースとし、側面地盤ばねの有無の2つのモデルを設定する（側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを図 4-49 に示す）。

解析モデルへの入力地震動は、3.11地震のはざとり波を表 4-2 に示す地盤モデルを用いて算定して建屋基礎版下位置の地震動とし、建屋各部の応答を評価する。



側面地盤ばね考慮



側面地盤ばね非考慮

	側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮するケース	側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮しないケース
建屋	原子炉建屋	
地震動	3.11 地震のはざとり波	
入力地震動	基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)	基礎版底面レベルの地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	3.11 地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰 7%)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り (側面地盤ばねの地盤定数は等価地盤の値から算定)	無し
地盤モデル	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤: Vs740m/s 一層)	

図 4-49 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

表 4-15 側面地盤ばね (Novak ばね) の設定に用いる埋戻し土及び等価地盤の物性値

建屋質点 レベル O.P. (m)	深さ (m)	埋戻し土				等価地盤				
		せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	せん断 弾性係数 $G$ ( $\times 10^4$ kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 $\nu$	せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	せん断 弾性係数 $G$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 $\nu$	減衰定数 $h_e$ (%)
15.0	0	88	1.48	18.6	0.45	242	1.25	21.0	0.45	4
6.0	9.0	113	2.42	18.6	0.45	336	2.42	21.0	0.45	4
-0.8	15.8	138	3.61	18.6	0.45	443	4.20	21.0	0.45	4
-8.1	23.1	158	4.73	18.6	0.45	536	6.15	21.0	0.45	4
-14.1	29.1	171	5.57	18.6	0.45	653	9.13	21.0	0.45	4

注：表層地盤と埋戻し土の物性値より等価地盤の物性値を算定

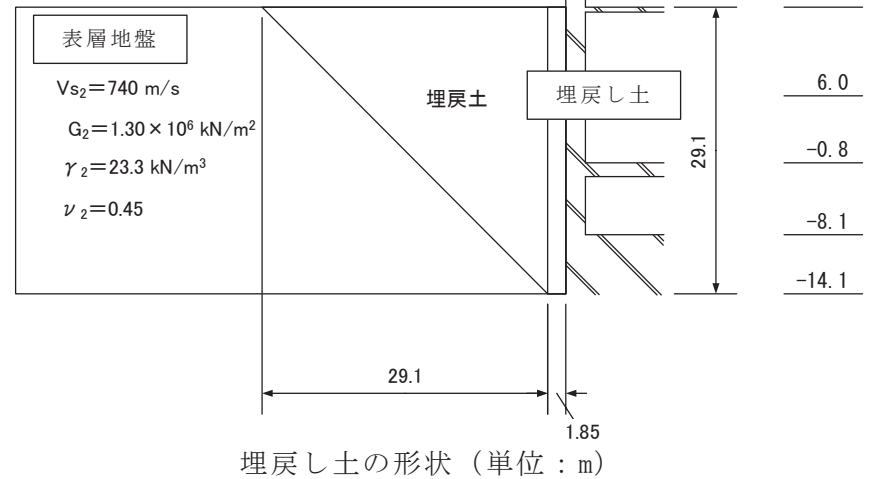
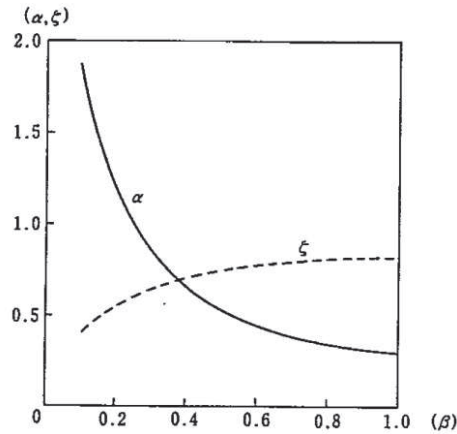
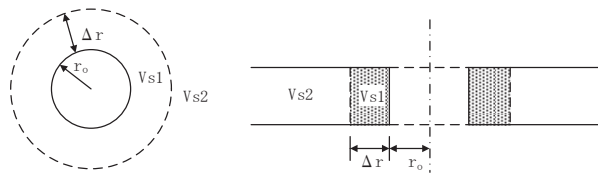
$$Y = (1 - \beta) \cdot \exp(-\alpha X^\zeta) + \beta$$

$$Y = V_{s2} / V_{s1}$$

$$\beta = V_{s1} / V_{s2}$$

$$X = \Delta r / r_0$$

$\alpha, \zeta$  : 右図参照



b. 検討結果

検討結果として 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較を **図 4-50** に示す。どちらの結果も観測記録に比べて大きな解析結果となっているが、側面地盤ばねがない場合の方が観測記録との適合性が良い。

女川原子力発電所第 2 号機の建設に当たっては、広くオープン掘削が行われ、また、埋戻し工事は掘削土を利用している。そのため、3.11 地震時には揺すり込み沈下が発生した箇所もある。過去の調査結果から算定される建屋近傍のせん断波速度は地震時の剛性低下率(3.11 地震 0.3~0.7)も考慮すると、 $V_s=100\sim 250\text{m/s}$  程度以下と評価される。建屋近傍の埋戻し土の著しい剛性低下によって、埋込み効果が期待できない状況になっていたものと考えられる。

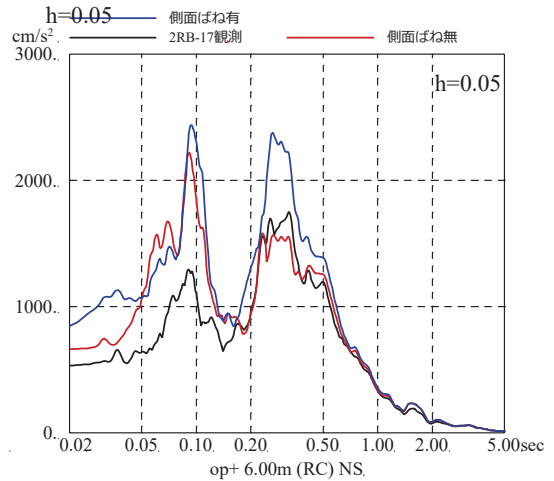
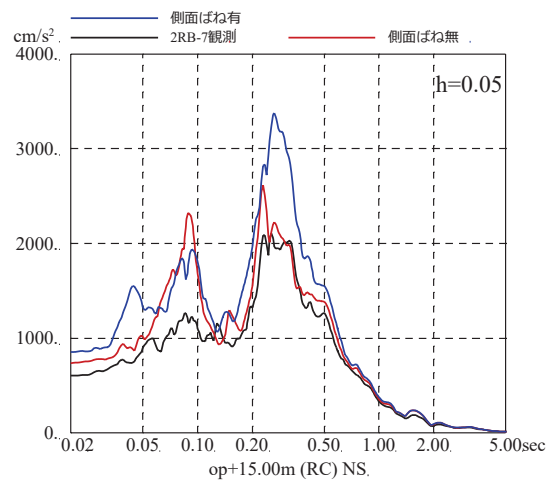
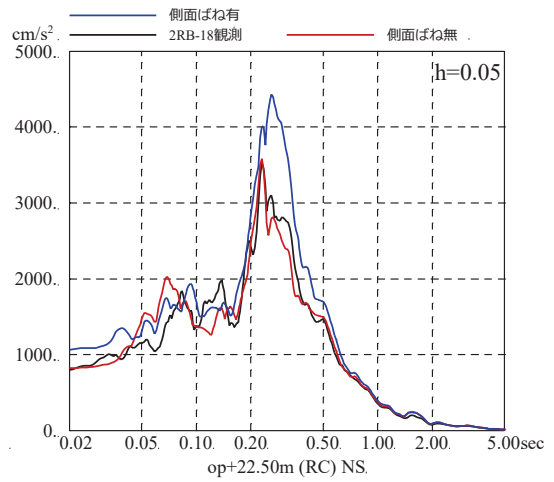
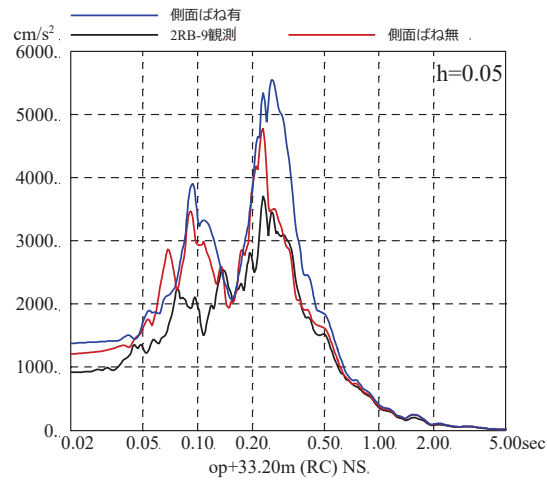
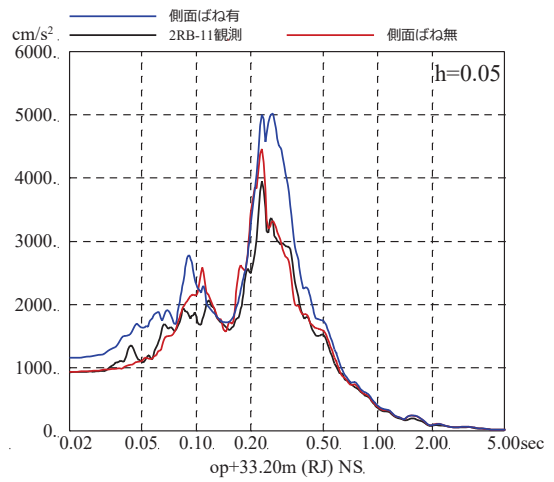
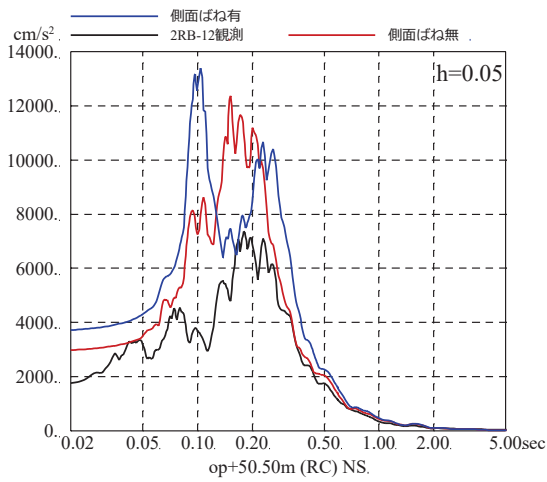


図 4-50 3.11 地震のはざとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較  
(原子炉建屋, NS 方向)

※地震計位置は、付録 1 参照

(3) 表層地盤が建屋応答に及ぼす影響検討（第3号機海水熱交換器建屋）

a. 検討方法

表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認するために、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている第3号機海水熱交換器建屋を対象に、地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録による建屋地震応答解析を実施した。地震応答解析モデルは以下の3種類を用いた。

- ① 側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したモデル（はざとり波入力）
- ② ①のモデルに対して、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮しないモデル（はざとり波入力）
- ③ 建屋減衰を変動させたモデル（基礎版上観測記録入力）

建屋の地震応答解析モデルは、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮するモデル及び建屋減衰を変動させたモデルともに既工認モデル（側面地盤ばねを考慮していない建屋－地盤連成モデル）をベースとしたモデルを用いた。

図4-51に第3号機海水熱交換器建屋の概要を示す。解析条件を表4-16に、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したケースの地震応答解析モデルを図4-52に、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を表4-17に示す。

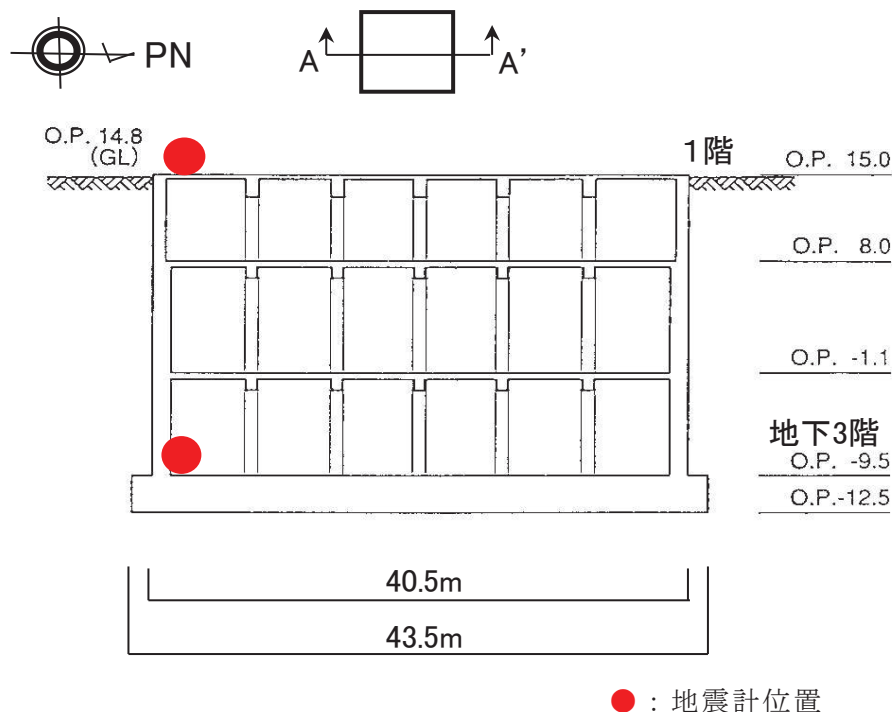


図4-51 第3号機海水熱交換器建屋の概要（A-A'）

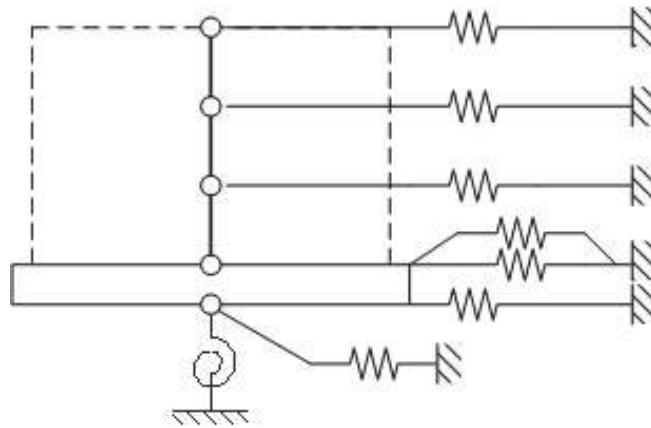
表 4-16 解析条件

(側面地盤ばね有無の影響検討 [第3号機海水熱交換器建屋])

	① 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケース ② 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮しないケース
建屋	第3号機海水熱交換器建屋
地震動	3.11 地震のはぎとり波
入力地震動	① 基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力を考慮) ② 基礎版底面レベル位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	既工認モデル (設計剛性, 建屋減衰 5%)
建屋モデル (側面地盤ばね)	① 有り ② なし
地盤モデル	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤: 盛土物性値)

	③ 建屋減衰を変動させたケース
建屋	第3号機海水熱交換器建屋
地震動	3.11 地震の基礎版上観測記録
入力地震動	基礎版底面レベルの地震動を逆算し入力 (2E 入力)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	既工認モデルをベースとして建屋減衰を変動 (設計剛性, 建屋減衰 20%)
建屋モデル (側面地盤ばね)	無し
地盤モデル	—





側面地盤ばね考慮

図 4-52 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケースの地震応答解析モデル

表 4-17 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数* <sup>2</sup> h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3* <sup>3</sup>
底面地盤	-12.5	26.1	1360	3
	-27.00	26.4	2040	3
	-50.00	26.5	2520	3
	-200.00	26.5	2520	3

注記\*1: O. P. 14.8m~O. P. -12.5m は, 上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 $G_0$ を設定する。また, ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

\*2: レーリー減衰

\*3: ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

b. 検討結果

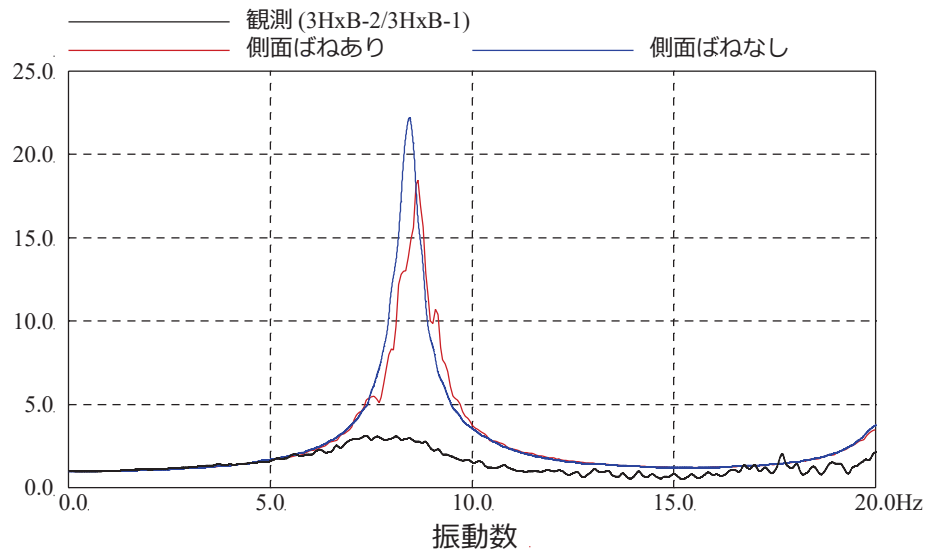
3種類の地震応答解析モデルによる検討結果は以下のとおり。

- ① 側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮する場合と考慮しない場合のモデルによる検討結果として、建屋基礎版（地下3階）に対する建屋上部（地上1階）の伝達関数、及び建屋上部（地上1階）の観測記録と解析による応答スペクトルとの比較を [図 4-53](#) に示す。

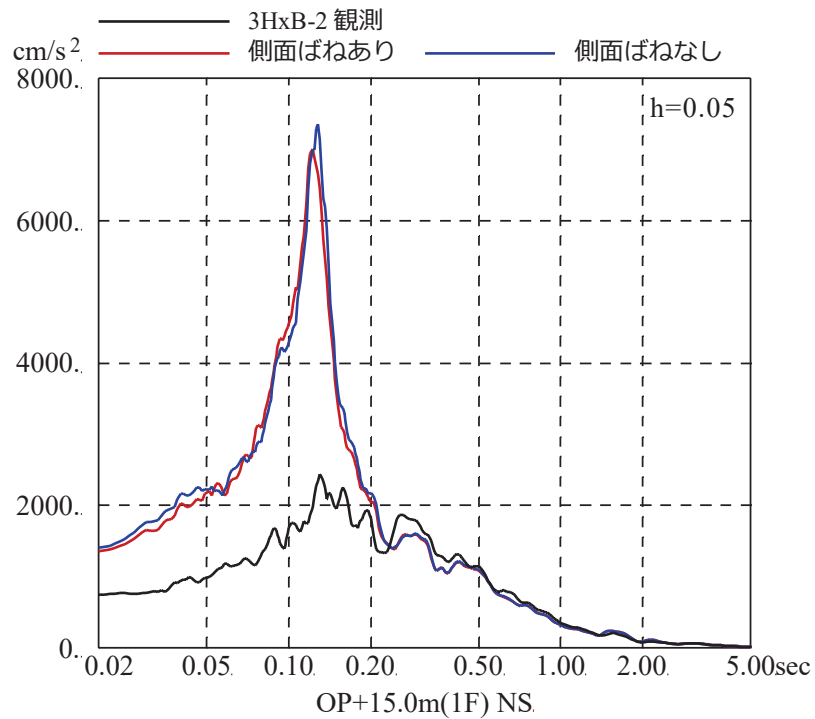
側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮しない場合（建屋減衰5%）の解析結果は観測記録に対しかなり過大であり、埋込みの効果が確認される。また、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮する場合（建屋減衰5%）も観測に比べ過大になっている。これは、建屋固有振動数（約8Hz）と表層地盤の卓越振動数（約2Hz）の乖離が大きく、Novak ばねから入力される地震動による影響が小さいためと考えられる。

- ② 建屋減衰を変動させたモデルによる検討結果として、建屋基礎版（地下3階）に対する建屋上部（1階）の伝達関数、及び建屋上部（1階）の観測記録と解析による応答スペクトルとの比較を [図 4-54](#) に示す。この検討では埋込み効果による応答低減効果を定量的に表すために、観測記録と整合する建屋減衰を同定した。その結果、建屋減衰を20%にすることにより解析と観測記録は整合するため、概ねこの減衰の差分（一般的な建屋減衰5%に対して20%相当の応答分）が埋込みによる低減効果相当量と考えられる。一方で、建屋の固有周期自体はあまりその影響を受けていない。

以上の検討から、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている第3号機海水熱交換器建屋においては、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したモデル、考慮しないモデルともに過大な応答を与えること、一方、観測記録からは埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。

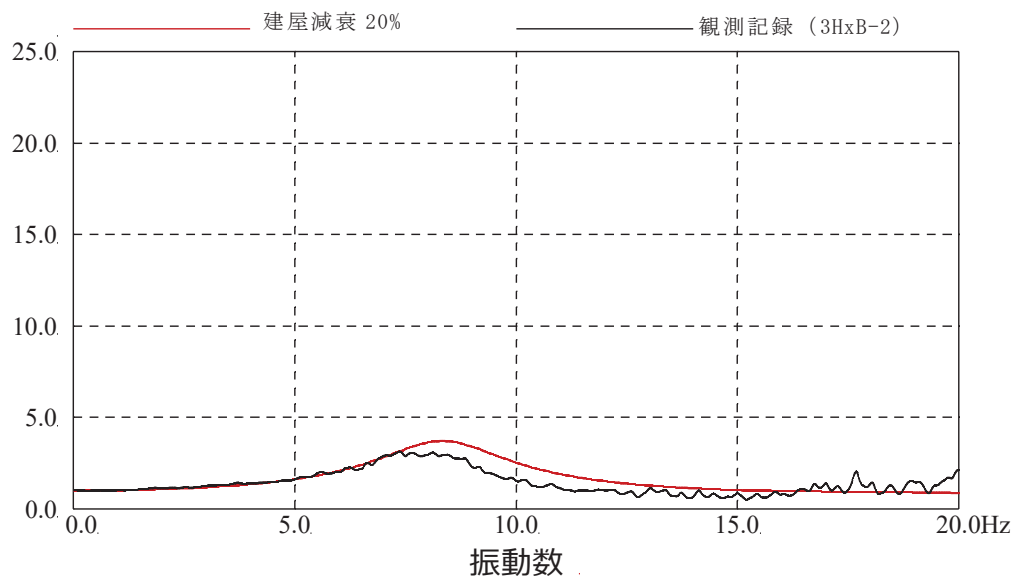


伝達関数の比較（地上1階／地下3階，NS方向）

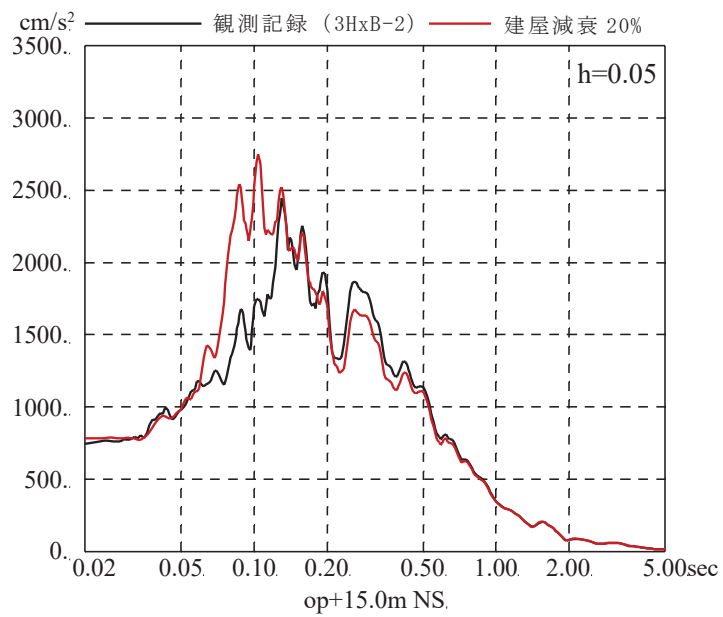


応答スペクトルの比較（地上1階，NS方向）

図 4-53 3.11 地震のはざとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較（第3号機海水熱交換器建屋）



伝達関数の比較（地上1階／地下3階，NS方向）



応答スペクトルの比較（地上1階，NS方向）

図 4-54 3.11 地震の基礎版上観測記録を用いた建屋減衰 20%とした場合のシミュレーション解析結果の比較（第3号機海水熱交換器建屋）

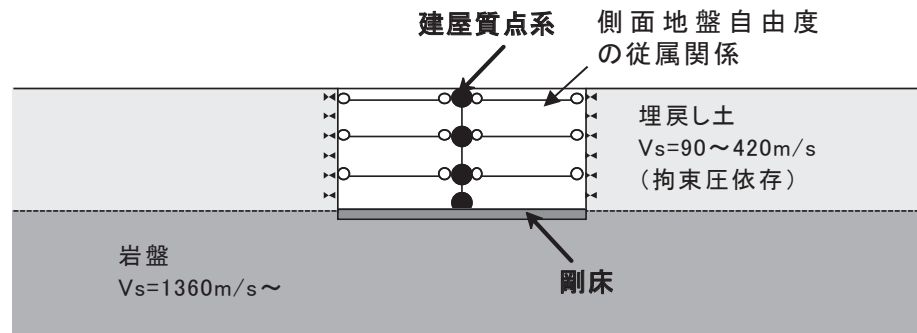
(4) 第3号機海水熱交換器建屋の3次元地盤FEMモデルによる検討

第3号機海水熱交換器建屋においては、前章の検討により側面地盤ばね（Novakばね）を考慮したモデルは過大な応答を与える一方で、観測記録からは埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が顕著に認められたことから、建屋周囲の地盤を3次元FEMでモデル化し表層地盤の影響を詳細に検討した。

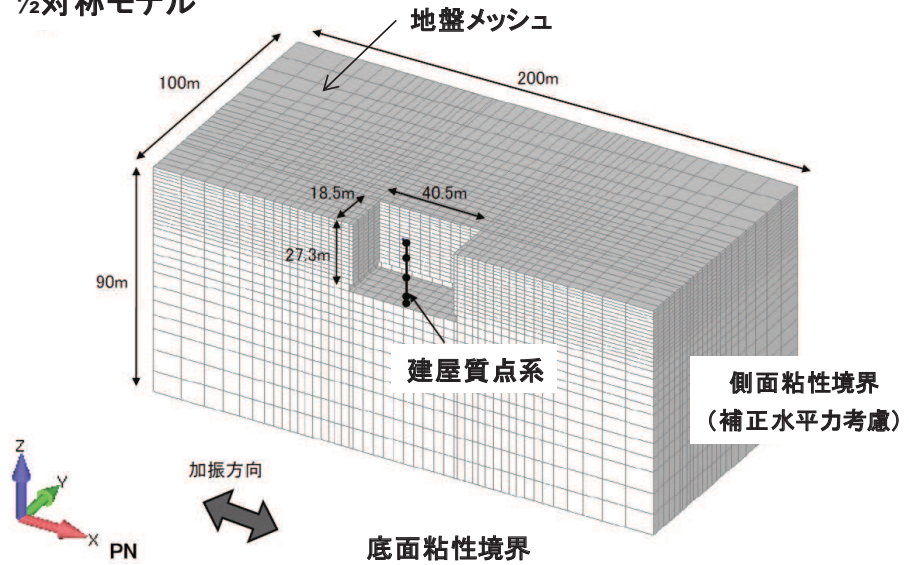
a. 3次元地盤FEMモデルの概要と検討方法

検討に用いた3次元地盤FEMモデルの概要を図4-55に示す。

入力地震動は3.11地震のNS方向とし、建屋周囲の地盤応答の空間分布について基礎版下基盤層及び地表面における建屋周囲の地盤応答を評価する。



1/2対称モデル



地盤	線形又は非線形(H-Dモデル)
建屋	線形
減衰	地盤建屋ともに共通：初期剛性比例型 振動数 4Hz, 8Hz に対して 3%のレーリー減衰
入力波	3.11 地震 NS 方向 時刻 35~75 秒の 40 秒間

図 4-55 3次元地盤 FEM モデルの概要

b. 検討結果

地上 1 階の観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図 4-56 に示す。

基礎版底面と同レベルの岩盤面の加速度応答スペクトル，地表面の加速度応答スペクトルを図 4-57，図 4-58 に，最大加速度分布，最大速度分布，最大ひずみ分布を図 4-59～図 4-61 に示す。

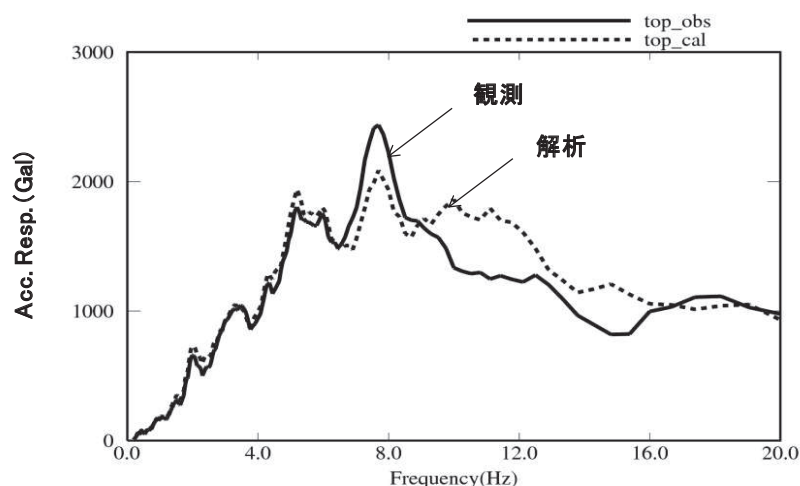
3次元地盤 FEM モデルによるシミュレーション解析では地上 1 階の観測記録と解析結果は概ね整合する結果となっている。

基礎版底面と同レベルの岩盤面の加速度応答スペクトルは、**図 4-57** から建屋近傍位置～建屋遠方位置まで自由地盤の応答スペクトルとほぼ同様となっており、位置の違いによる差は小さいことがわかる。

地表面の加速度応答スペクトルは、**図 4-58** から位置による違いが顕著であり建屋応答による影響が見られる。周期 0.5 秒付近のピークは自由地盤の 1 次卓越周期であり、建屋近傍位置では地盤が建屋側面に拘束されて増幅率が小さく、遠方位置自由地盤の応答に近づいている。周期 0.2 秒付近のピークは建屋側面に対して中間位置で増大し、遠方位置では減少し自由地盤の応答に近づいている。

**図 4-59** の最大加速度分布は比較的複雑な分布となるが、建屋近傍は遠方よりも小さい傾向が見られる。**図 4-60** の最大速度分布は建屋から離れるにつれて自由地盤に近づく傾向であり、建屋近傍は小さめである。**図 4-61** の最大ひずみ分布は建屋近傍の地盤は建屋に拘束されて遠方地盤に比べて最大ひずみは小さくなっている。

以上から、建屋周囲の地盤の応答分布には偏りが生じており、建屋近傍では建屋影響があり、離れるに従い自由地盤の応答に近づく傾向が確認された。Novak ばねによる埋込み効果が実際の応答を現しにくいのは、Novak ばねでは遠方（自由地盤相当）の地盤性状をモデル化しているため、検討対象である第 3 号機海水熱交換器建屋周囲の地盤状況では、建屋近傍の実際の地盤応答が建屋により抑えられていることをうまく再現できないことから、建屋に入力する地震動を大きく見積もる場合があること等が要因の一つと考えられる。



**図 4-56** 加速度応答スペクトル (h=5%)  
(建屋上部 (地上 1 階), NS 方向)

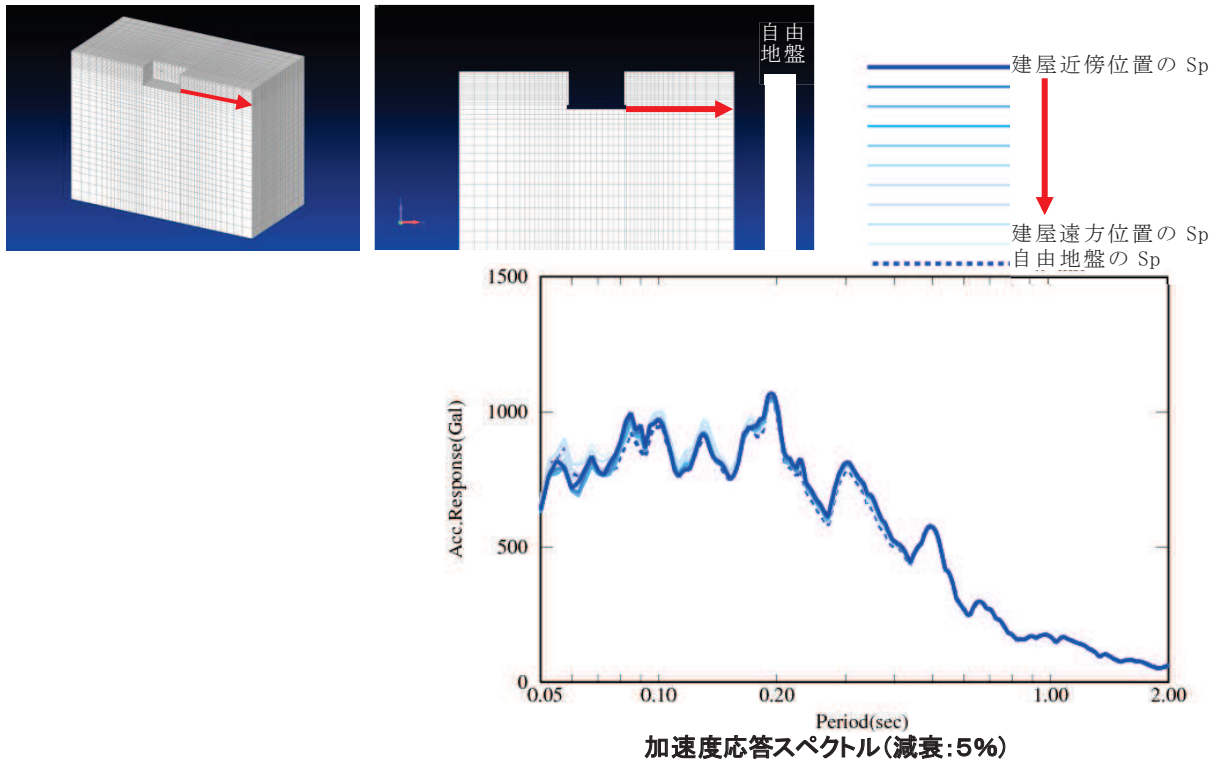


図 4-57 加速度応答スペクトル (基礎版底面と同レベルの岩盤面)

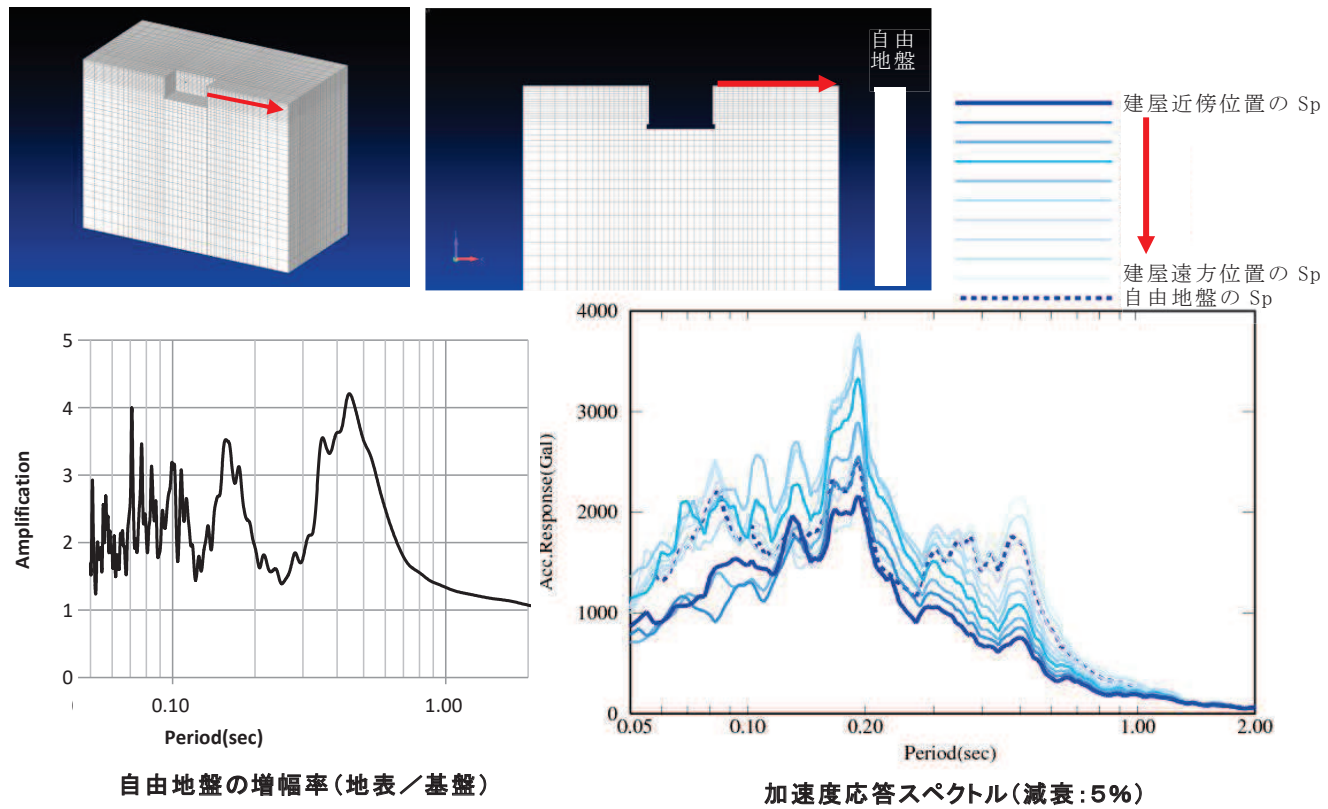


図 4-58 加速度応答スペクトル (地表面)



自由地盤

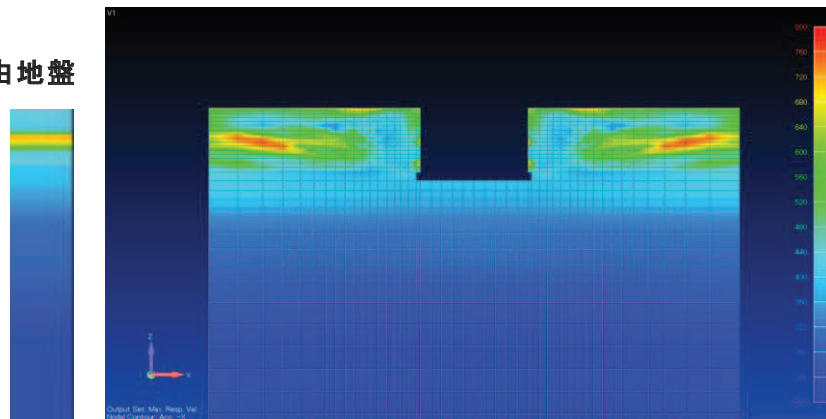


図 4-59 最大加速度分布

自由地盤

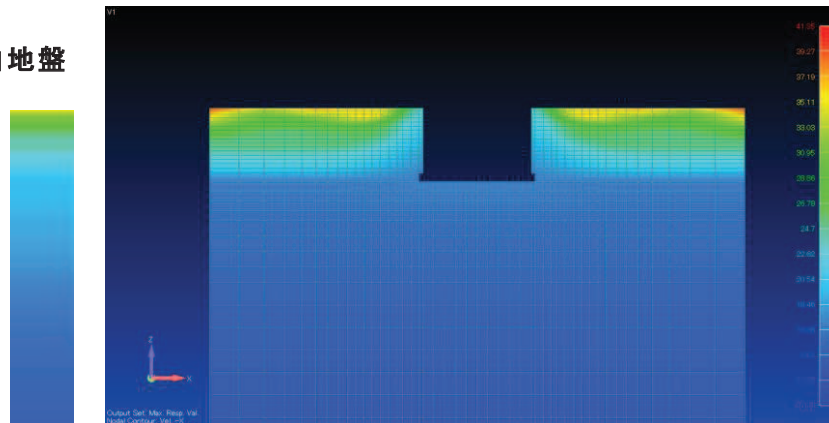


図 4-60 最大速度分布

自由地盤

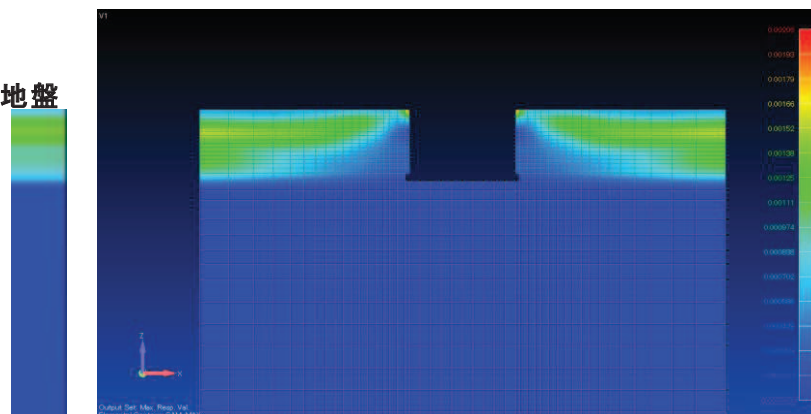


図 4-61 最大ひずみ分布

(5) 基準地震動  $S_s$  時の表層地盤の非線形化による埋込み効果の影響

a. 検討方法

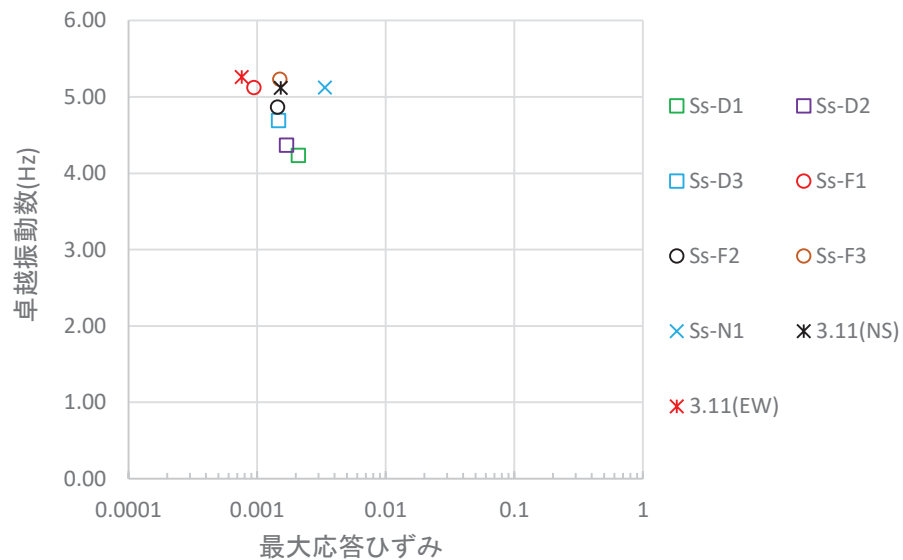
基準地震動  $S_s$  時の表層地盤上部の非線形化の状況を推定することを目的として、基準地震動  $S_s$  を入力した際の地盤の最大ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係を整理する。

b. 検討結果

地盤の最大応答ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係を **図 4-62** に示す。

基準地震動  $S_s$  では、3.11 地震に比べ表層地盤の非線形化が進み、卓越周期がより長周期化する。特に建屋近傍の埋戻し部分については、過去の調査結果から算定される 3.11 地震時の剛性低下率（3.11 地震では約 0.3~0.7）も考慮すると、表層地盤のせん断波速度は  $V_s=100\sim 250\text{m/s}$  程度以下と評価され、基準地震動  $S_s$  では更に低下することになる。

従って、表層地盤の非線形化が大きくなることで、埋込み効果が建屋応答に与える影響は 3.11 地震時よりも基準地震動  $S_s$  時は小さいと考えられる。



**図 4-62** 地盤の最大応答ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係

(6) 埋込み効果が建屋応答に与える影響（詳細は別紙16参照）

a. 検討概要

原子炉建屋の今回工認では、側面地盤ばね（Novak ばね）はモデル化しない方針である。これは、建屋周辺の埋め戻しの施工状況から拘束効果は期待できないこと、また、3.11地震のシミュレーション解析では埋込み効果を見逃したモデルによる応答結果が観測記録と整合することを踏まえて判断したものである。

また、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」では、支持地盤と側面地盤のせん断波速度  $V_s$  の違いが大きい場合、Novak ばねの適用性について留意することとされており、硬質岩盤における Novak ばねの課題を指摘した論文もある。

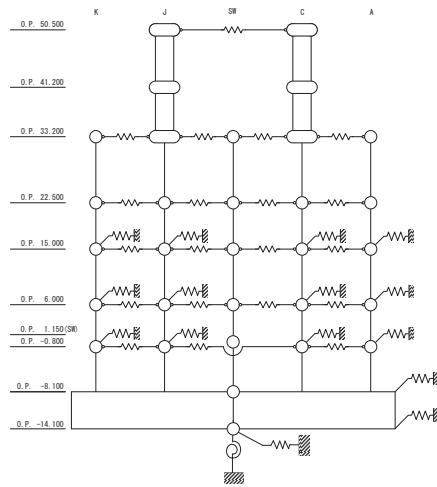
今回工認では E+F 入力を採用するため、埋込み効果に関するトータルの保守性の確認が必要であり、観測記録を用いた検討を行う。

b. 検討方法

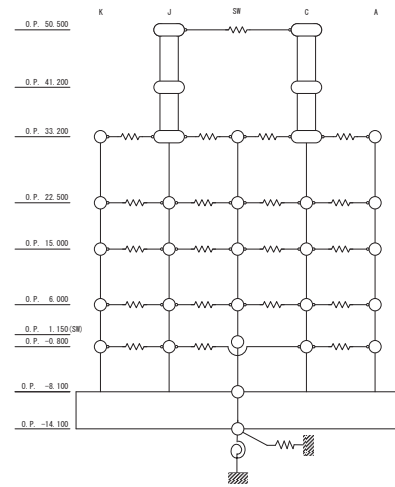
検討は、側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて基準地震動  $S_s - D_2$  による地震応答解析を行う。

側面地盤は、前節にて設定した地盤物性値を用いて入力地震動を算定した際の収束物性値（地盤各層のせん断剛性低下率の最小値）を用いて、地盤を地中の質点位置ごとに、支配高さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねを Novak の方法（「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」による方法）により算定する。また、同レベルの質点は床ばねで接続されているので、各質点が支配する外周長を全周長で除した比率をばね値に乘じ、各質点に振り分ける。側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを図 4-63 に、側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値を表 4-18 に示す。

さらに、固有モードの違いや側面地盤ばね（Novak ばね）から入力される地震動の傾向を確認し、応答結果の差異について分析する。



側面地盤有



側面地盤無

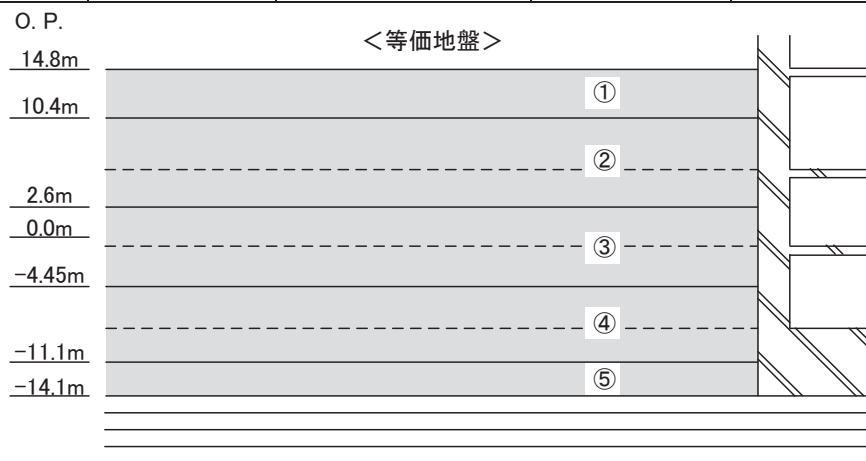
	側面地盤ばね(Novak ばね)を考慮するケース	側面地盤ばね(Novak ばね)を考慮しないケース
建屋	原子炉建屋	
地震動	基準地震動 $S_s - D_2$	
入力地震動*	基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力)	基礎版底面レベルの地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 耐震補強考慮, 建屋減衰 5%)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り (側面地盤ばねの地盤定数は等価地盤の値から算定)	無し
地盤モデル	入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤: 2 層モデル)	

注記\*: 地震応答解析モデルへの入力地震動は、まず、解放基礎表面以深の地盤を一次元地盤としてモデル化し、解析コード「SHAKE」を用いて一次元波動論に基づく評価により O.P. -200m の入射波を算定する。次に、解析コード「mflow」を用いて、解析コード「SHAKE」により算定した O.P. -200m の入射波を、表層地盤の非線形性を考慮した一次元地盤モデルに入力して逐次非線形解析を行い、建屋基礎底面及び側面地盤ばね位置での地盤の応答を評価して入力地震動とする。

図 4-63 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

表 4-18 側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値

建屋 質点 レベル O.P. (m)	層 No.	等価地盤				
		せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	せん断弾性係数 $G$ ( $\times 10^4$ kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 $\nu$	減衰定数 $h_e$ (%)
15.0	①	157	4.69	18.6	0.45	3
6.0	②	204	7.94	18.6	0.45	3
-0.8	③	755	12.6	21.6	0.45	3
-8.1	④	900	193	23.3	0.45	3
-14.1	⑤	900	193	23.3	0.45	3



埋戻し土の形状 (単位 : m)

c. 検討結果

各モデルの固有値解析結果を表 4-19 に、固有モードの比較を図 4-64～図 4-68 に、側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮した解析モデルへの入力となる側面地盤ばね位置の加速度波形 (E+F 波) の算定結果を図 4-69 に、側面地盤ばねの有無をパラメータとした地震応答解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図 4-70 に示す。

表 4-19 及び図 4-64～図 4-68 より、側面地盤ばねの有無が固有モードに与える影響は小さいことが確認できる。従って、側面地盤ばねによる拘束効果は小さい傾向にある。

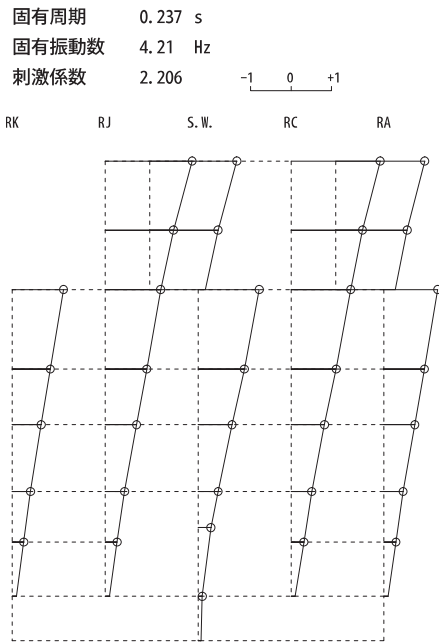
図 4-69 より、側面地盤の揺れは最上層で  $2000\text{cm/s}^2$  を超える大きさになっており、これは建屋の同一レベルの揺れに比べ 2 倍程度の大きさとなる。また、表層地盤の 1 次、2 次モードに相当する周期帯で特に大きい傾向にある。

図 4-70 より、地震応答解析の結果では、側面地盤ばね有りモデルの方が大きい応答結果を与える階が生じていることが確認できる。

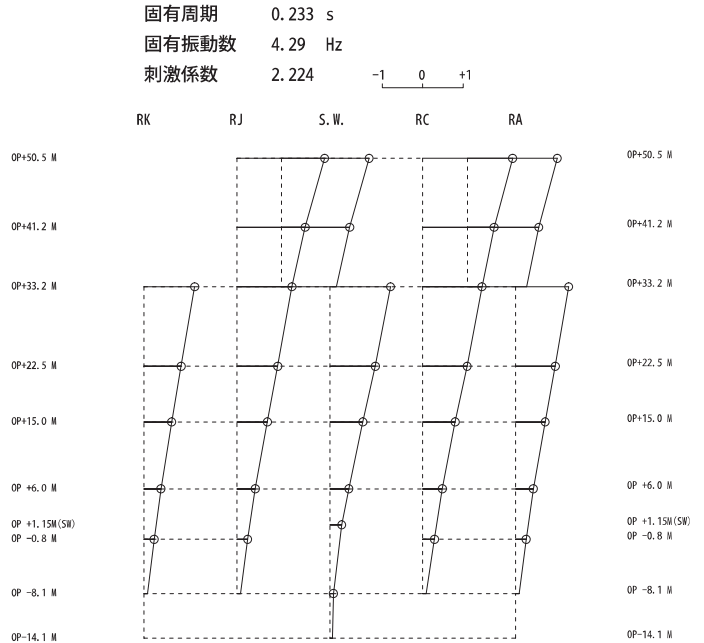
このことから、支持地盤と側面地盤のせん断波速度  $V_s$  の違いが大きい場合、側面地盤からの入力が大きくなるため、側面地盤ばねの精度によって誤差の大きい結果を与えるおそれがあることから、原子炉建屋の応答結果も、側面からの入力の影響で差異が生じていると考えられる。

表 4-19 固有値解析結果 (NS 方向)

次数	側面地盤ばねなし			側面地盤ばねモデル (S <sub>s</sub> -D <sub>2</sub> )		
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数
1	0.237	4.21	2.206	0.233	4.29	2.224
2	0.123	8.13	2.743	0.122	8.17	2.678
3	0.116	8.60	1.100	0.116	8.63	1.174
4	0.097	10.33	2.094	0.096	10.41	2.013
5	0.093	10.76	1.098	0.093	10.81	1.264

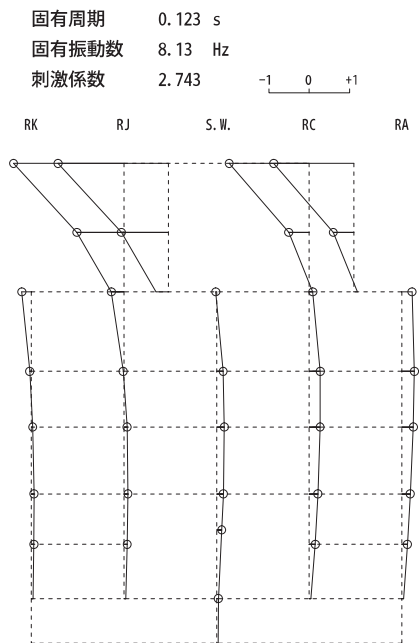


側面地盤ばねなし

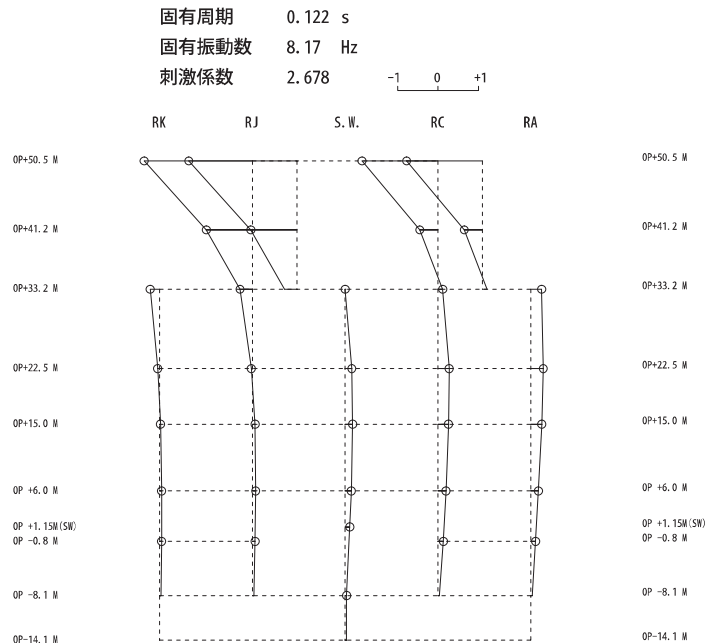


側面地盤ばねあり (S s - D 2 地盤)

図 4-64 固有モードの比較 (NS 方向 1 次)



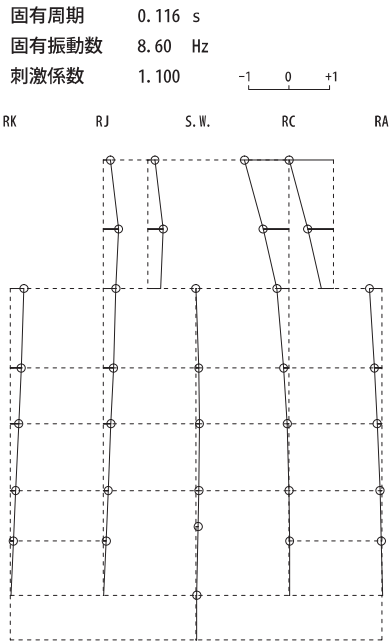
側面地盤ばねなし



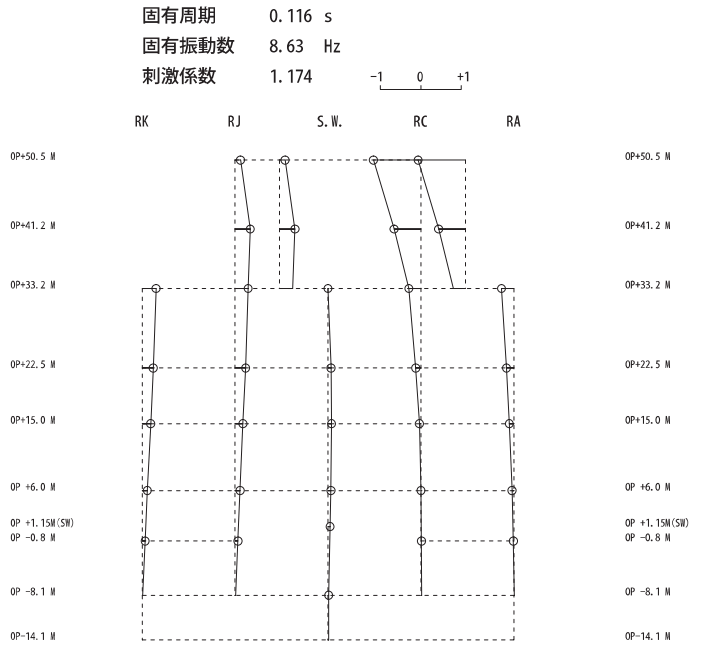
側面地盤ばねあり (S s - D 2 地盤)

図 4-65 固有モードの比較 (NS 方向 2 次)



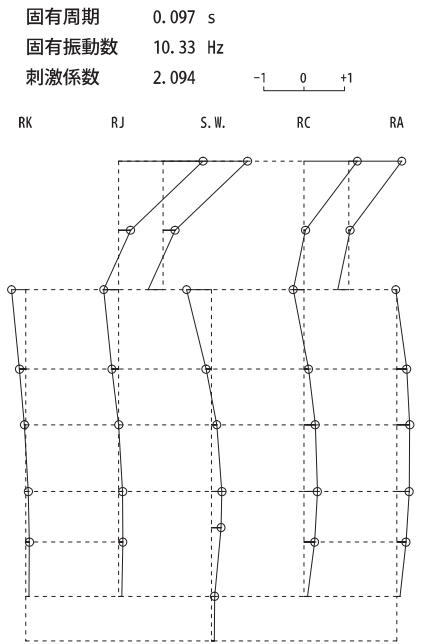


側面地盤ばねなし

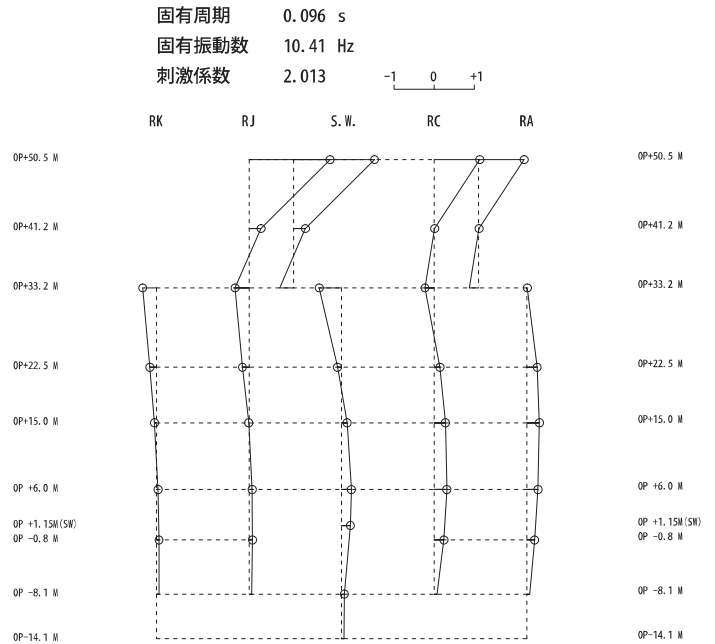


側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub>地盤)

図 4-66 固有モードの比較 (NS 方向 3 次)

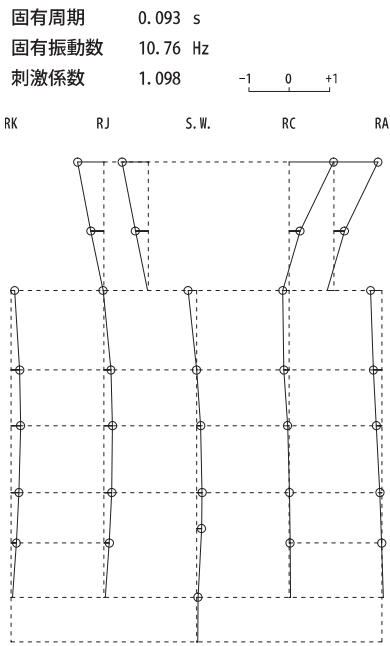


側面地盤ばねなし

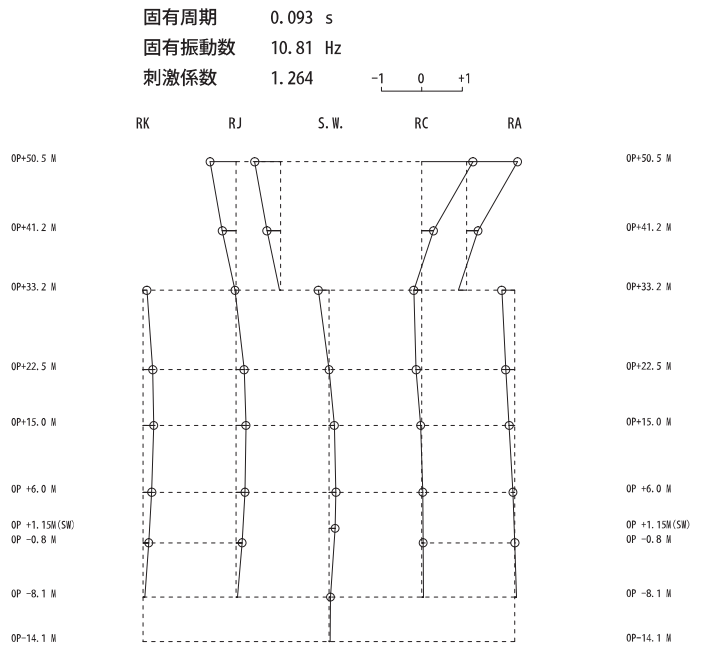


側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub>地盤)

図 4-67 固有モードの比較 (NS 方向 4 次)



側面地盤ばねなし



側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub>地盤)

図 4-68 固有モードの比較 (NS 方向 5 次)

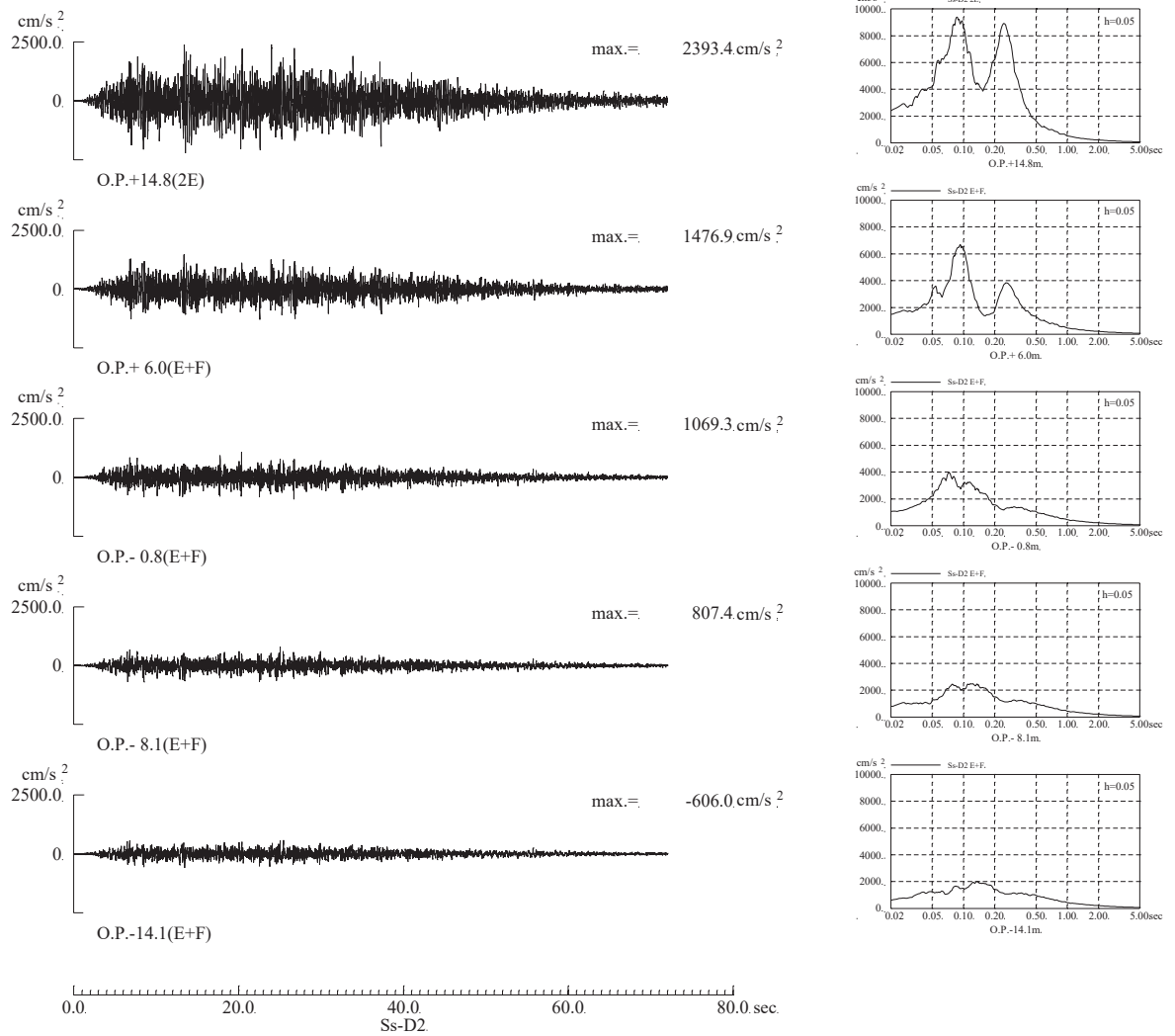


図 4-69 側面地盤ばね位置の地盤の加速度波形（基準地震動 S<sub>s</sub>-D2）

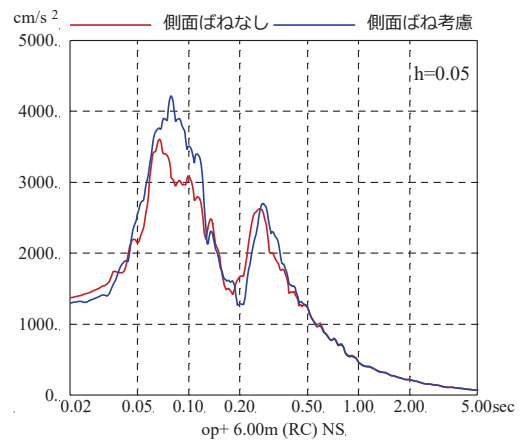
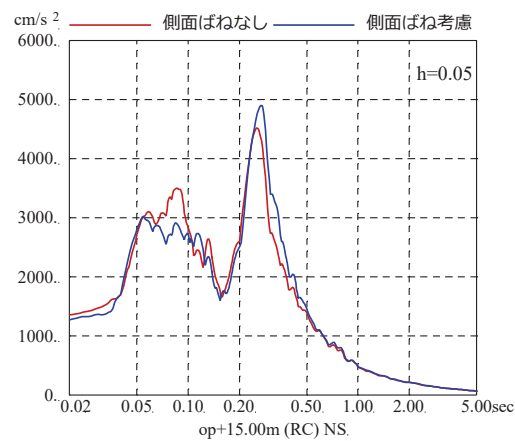
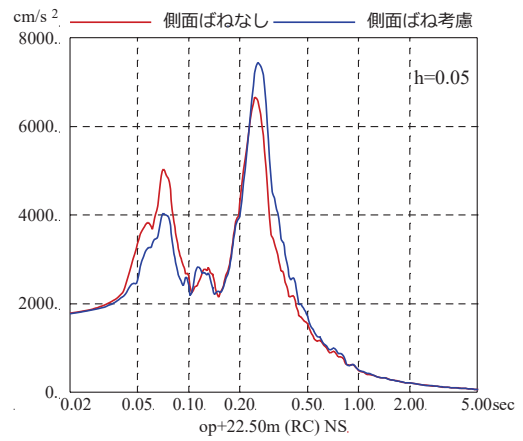
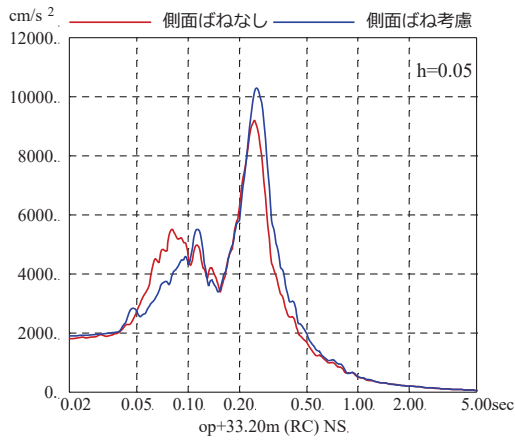
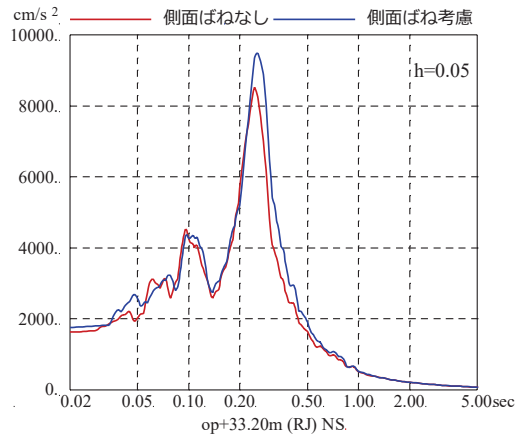
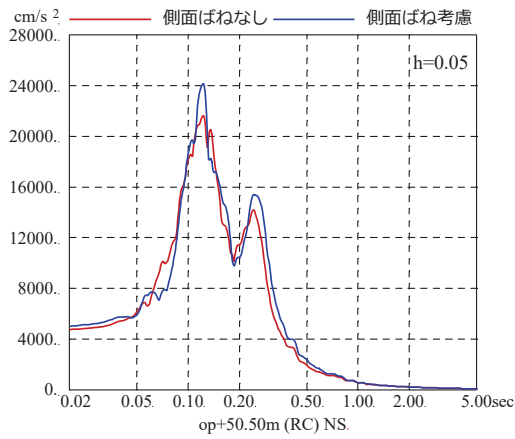


図 4-70 基準地震動  $S_s - D_2$  を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (原子炉建屋, NS 方向, 建屋減衰 5%)

(7) 建屋の応力解析における地震時増分土圧の評価方針

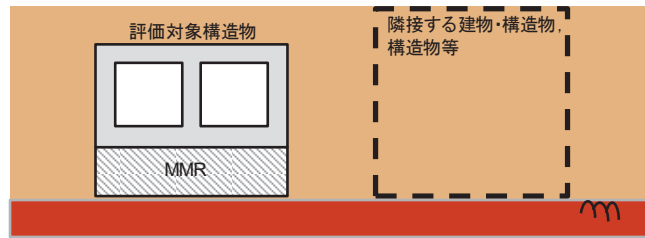
地震応答解析では側面地盤が建屋応答に与える影響が小さいことを確認した上でその影響を無視しているが、建屋の応力解析においてはこの影響を考慮する。具体的には、側面地盤による土圧（常時土圧、地震時増分土圧）を算定し、地震荷重と組み合わせて評価を行う。地震時増分土圧荷重は、修正物部・岡部式及び「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づいて求めた包絡値、又は FEM 解析により土圧を算定する。今回工認対象建屋の応力解析における地震時増分土圧の算定方法について、表 4-20 に示す。

表 4-20 今回工認対象建屋の応力解析における地震時増分土圧の算定方法

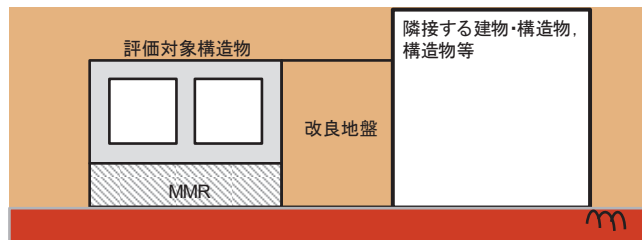
建屋	応力解析 (基礎版)	地震時増分土圧 評価方法	隣接建屋等の考慮
原子炉建屋	FEM モデル	2D-FEM	EW 方向について東側改良地盤考慮
制御建屋	FEM モデル	2D-FEM (NS 方向)	考慮なし (土圧は隣接建屋のない北側及び南側の一部で考慮)
緊急用電気品建屋	FEM モデル	JEAG 式	—
緊急時対策建屋	FEM モデル	JEAG 式	—

なお、屋外重要土木構造物の評価においては、構造物と地盤の相互作用について土圧を含めて考慮できる連成系の地震応答解析手法を用いて耐震評価を実施する方針としている。

また、屋外重要土木構造物と隣接する建物・構築物間が盛土で埋め戻されている場合には、隣接する建物・構築物をモデル化した方が表層地盤の変形が抑制され評価対象構造物に作用する土圧が低減されると考えられることから、隣接する建物・構築物はモデル化しない。屋外重要土木構造物と隣接する建物・構築物間が地盤改良されている場合には、剛性の大きい改良地盤を介して隣接する建物・構築物の地震時応答が評価対象構造物に伝達することから隣接する建物・構築物を含めてモデル化する。



評価対象構造物と隣接する建物・構築物の  
間が盛土で埋め戻されている場合



評価対象構造物と隣接する建物・構築物の  
間が地盤改良されている場合

図 4-71 屋外重要土木構造物の土圧に関する評価方針

(8) 検討結果のまとめ

原子炉建屋及び第3号機海水熱交換器建屋について、側面地盤ばね（Novak ばね）の有無が建屋応答に与える影響等を、地震観測記録を用いた建屋応答解析により確認した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 建屋重量の重い原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析、また、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている第3号機海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析の両方で、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮した応答結果は観測記録より過大な応答結果を与えた。
- ② 第3号機海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。

「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」では、側面地盤ばね（Novak ばね）は、支持地盤と表層地盤のインピーダンス比が大きい場合、その適合性に留意する必要があることが記載されているが、特に女川のように支持地盤が硬質岩盤で、埋戻し土に掘削土等を用いて施工した場合には、Novak ばねは過大な応答結果を与えるおそれがあるため、今回工認の原子炉建屋の地震応答解析モデルには側面地盤ばねは適用しないこととする。

また、第3号機海水熱交換器建屋については、Novak ばねによる埋込み効果は実際の応答を現しにくい（過大な応答となる）一方で、観測記録によるシミュレーション解析から埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることから、そのメカニズムについて表層地盤を3次元地盤 FEM でモデル化し検討を行った。その結果、3次元地盤 FEM モデルでは、3.11 地震のシミュレーション解析で建屋上部の応答が概ね観測記録と整合しており、建屋近傍の表層地盤の応答は建屋応答の影響を受けて、遠方の自由地盤の応答とは違った傾向となること、最大加速度、最大速度、最大ひずみは建屋近傍よりも遠方の自由地盤のほうが大きめとなることが確認された。したがって、Novak ばねによる埋込み効果が実際の応答を現しにくいのは、Novak ばねでは遠方（自由地盤相当）の地盤性状をモデル化しているため、検討対象である第3号機海水熱交換器建屋周囲の地盤状況では、建屋近傍の実際の地盤応答が建屋により抑えられていることをうまく再現できないことから、建屋に入力する地震動を大きく見積もる場合があること等が要因の一つと考えられる。

なお、原子炉建屋のモデルに側面地盤ばね（Novak ばね）を設け基準地震動  $S_s$  を入力した地震応答解析を実施したところ、側面地盤ばね無しのモデルに比べ大きい応答結果を与える階が生じたため、その要因について分析した。その結果、原子炉建屋のモード図の違いや表層地盤から入力される地震動の大きさ等から、

硬質岩盤では Novak ばねを介して入力する地震動の評価に課題があることが確認された。



## 5. 設計への反映

### 5.1 設定した入力地震動評価用地盤モデルの概要

#### (1) 地震応答解析モデルへの入力概要

基準地震動  $S_s$  の入力に際しては、表層地盤の影響を考慮した地震動を入力 (E+F 入力) することに加えて、表層地盤について、地震動の振幅に応じた非線形特性を考慮する地盤モデルを採用する。なお、埋込み効果は無視する。

地震応答解析モデルへの入力は、水平方向は解放基礎表面で定義された基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  から、建屋基礎版底面レベル (O.P. -14.1m) より上部の地盤の振動特性を考慮して評価した地震動を入力する。

地震応答解析モデルへの入力概要 (水平方向) を図 5-1 に示す。

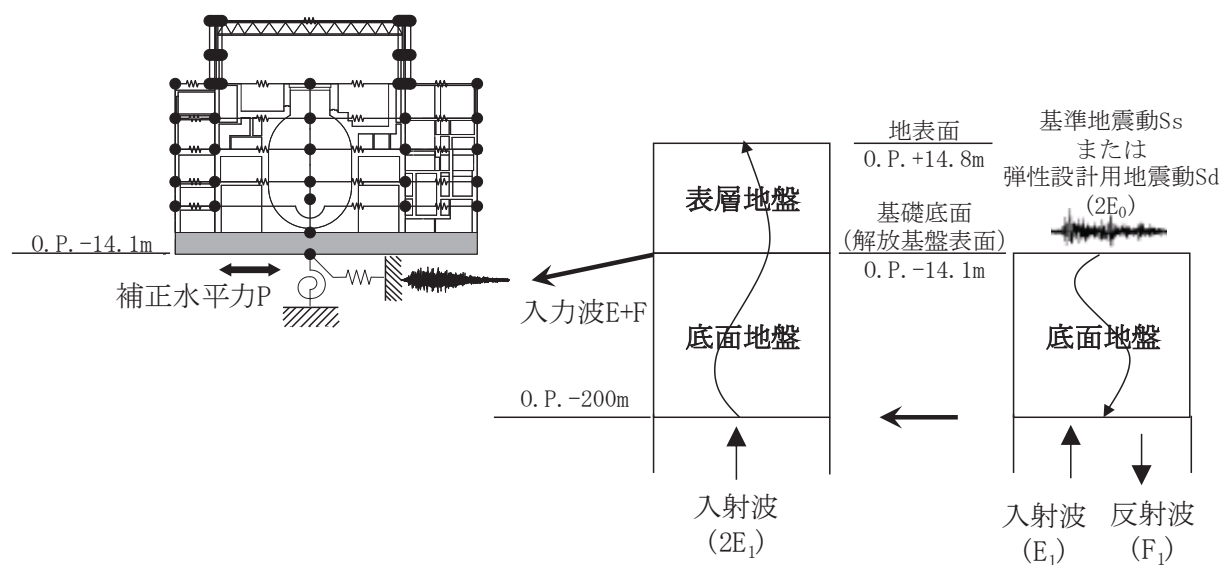


図 5-1 地震応答解析モデルへの入力概要 (水平方向)

(2) 入力地震動評価用地盤モデルの地盤物性値

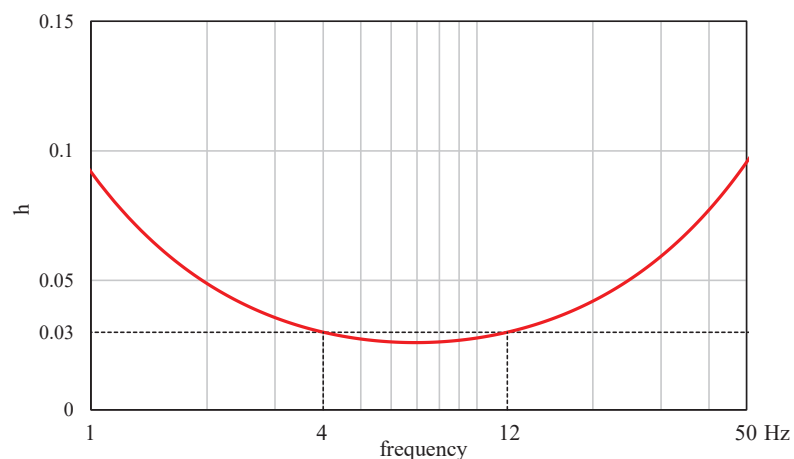
今回工認における原子炉建屋への入力地震動評価に用いる地盤モデルの地盤物性値は表 5-1 に示す地盤物性値とした。

表 5-1 原子炉建屋の入力地震動評価用地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数* <sup>2</sup> h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3* <sup>3</sup>
	0.00	23.3	900* <sup>4</sup>	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

注記\*1：O. P. 14.8m～O. P. 0m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断剛性  $G_0$  を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。地盤の応答解析においては 10 層に分割する。

\*2：レーリー減衰 (4Hz, 12Hz)



\*3：ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

\*4：PS 検層結果と観測記録の分析より設定

O. P. 14. 8m～0. P. 0mの表層地盤には地盤調査結果に基づき、初期せん断剛性  $G_0$ 、 $G/G_0 - \gamma$  曲線及び  $h - \gamma$  曲線の非線形特性を図 5-2 ( $G/G_0 - \gamma$  曲線) 及び図 5-3 ( $h - \gamma$  曲線) のとおり設定した。

初期せん断剛性  $G_0$  は、PS 検層結果により (5.1-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (5.1-1)$$

$$\text{ここで, } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z : \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0 - \gamma$  曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度  $\tau_m$  と初期せん断剛性  $G_0$  から、基準ひずみ  $\gamma_m$  を算定し (5.1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (5.1-2)$$

$$\text{ここで, } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h - \gamma$  曲線は、繰返し三軸試験結果に基づき (5.1-3) 式により求める。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (5.1-3)$$

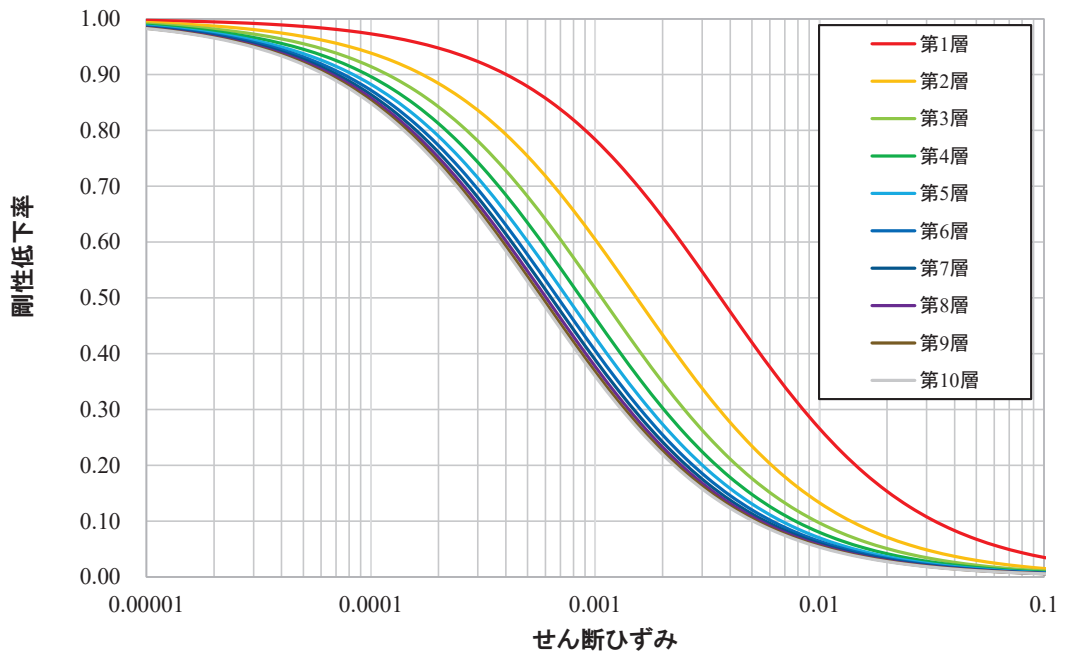


図 5-2  $G/G_0 - \gamma$  曲線

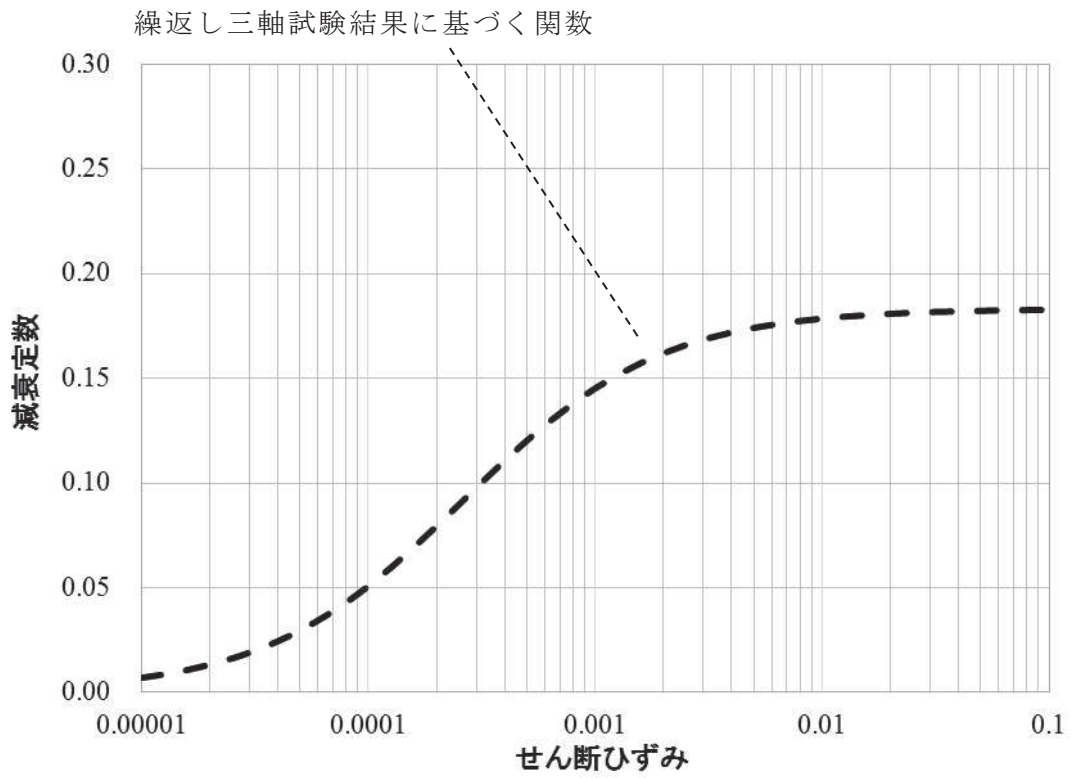


図 5-3  $h - \gamma$  曲線

## 5.2 建屋の表層地盤による影響を考慮する建屋

### 5.2.1 既設建屋

今回工認で基準地震動  $S_s$  の地震応答解析を行う既設建屋のうち、表層地盤の影響検討は以下の手順で実施する。

- ① 建屋の周辺状況等から検討対象建屋を選定
- ② 3.11 地震等によるシミュレーション解析から E+F 効果を確認、また埋込み効果の影響を確認

検討対象建屋は、「J E A G 4 6 0 1」の建屋埋込み効果の評価法（E+F 入力、側面地盤ばね）を参照し、埋込み深さがある程度深く、かつ 2～3 面程度周辺地盤と接している建屋を選定する。また、建屋の規模や周辺地盤の埋戻し状況により、側面地盤による建屋の振動特性への影響が異なってくると考えられることからそれらの項目についても整理する。埋込み深さ、建屋周辺の地盤状況、建屋規模、建屋周辺の埋戻し状況を整理した結果を表 5-2 に示す。

埋込み深さがある程度深い建屋については、表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定が可能と考えられるが、採用に当たっては側面地盤による埋込み効果による影響についても検討する必要があると考えられることから 2～3 面程度周辺地盤と接している建屋を検討対象建屋とする。

また、建屋規模が大きい場合には側面地盤の影響は小さく、建屋規模が小さい場合には側面地盤の影響が大きいと考えられるため、それぞれの建屋について側面地盤の影響検討を実施する。

以上より、検討対象建屋は、既に検討実施した原子炉建屋の他にタービン建屋及び第 3 号機海水熱交換器建屋を選定し、3.11 地震の観測記録を用いて表層地盤の影響が現れているかシミュレーション解析により検討することで、原子炉建屋と同様の評価が適用可能かどうかについて確認する。

検討は、はぎとり波を用いたシミュレーション解析を実施し、3.11 地震のはぎとり波を建屋モデルに直接入力（2E 入力）した場合と、地盤調査結果及び原子炉建屋における検討結果に基づき設定した地盤モデルを用いて表層地盤の影響を考慮して算定した建屋基礎版底面レベルの地震動を入力（E+F 入力）した場合の観測記録の再現性を確認した。検討の概念図を図 5-4 に示す。（詳細は、別紙 18 参照）

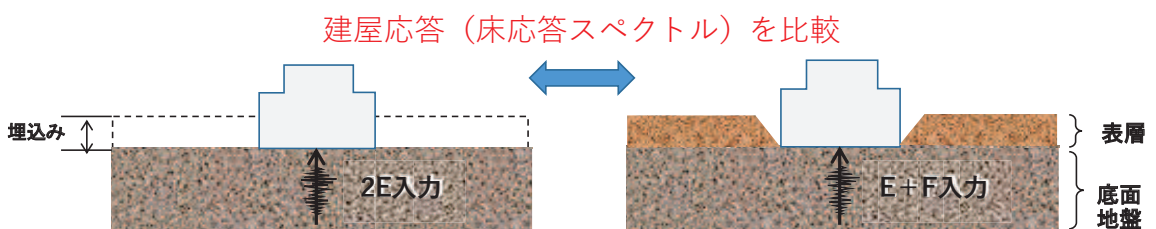


図 5-4 検討の概念図

3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析結果と観測記録の床応答スペクトルの比較をタービン建屋については図 5-5 に、第 3 号機海水熱交換器建屋については図 5-6 に示す。

どちらの建屋についても床応答スペクトルは、はざとり波を直接入力（2E 入力）した場合より表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力（E+F 入力）した方が、より観測記録の振幅に近く、床応答スペクトルの形状も調和的であり、建屋に入力する地震動については表層地盤の影響が現れている。

上記の検討を踏まえ、表 5-5 に示すとおり、今回工認で表層地盤の影響を考慮する既設建屋は、原子炉建屋、タービン建屋及び第 3 号機海水熱交換器建屋とする。

表5-2 今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎版底面 レベル)	周辺地盤と の接地状況	建屋規模	建屋周辺の 埋戻し状況	表層地盤による 埋込み効果の影響	検討対象建屋
原子炉建屋	約 29m (O.P. -14.1m)	3 面接地	大規模	掘削土	小 (Novak ばね適用には課題有)	対象
制御建屋	約 16m (O.P. -1.5m)	1~2 面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況より Novak ばね適用 外)	対象外
タービン建屋	約 17m (O.P. -2.2m)	2~3 面接地	大規模	掘削土	小 (Novak ばね適用には課題有)	対象
補助ボイラー建屋	約 7m (O.P. 8.0m)	2 面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況より Novak ばね適用 外)	対象外
第 3 号機 海水熱交換器建屋	約 27m (O.P. -12.5m)	4 面接地	小規模	掘削土	大 (Novak ばね適用には課題有)	対象
第 1 号機 制御建屋	約 15m (O.P. 0m)	2 面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況より Novak ばね適用 外)	対象外

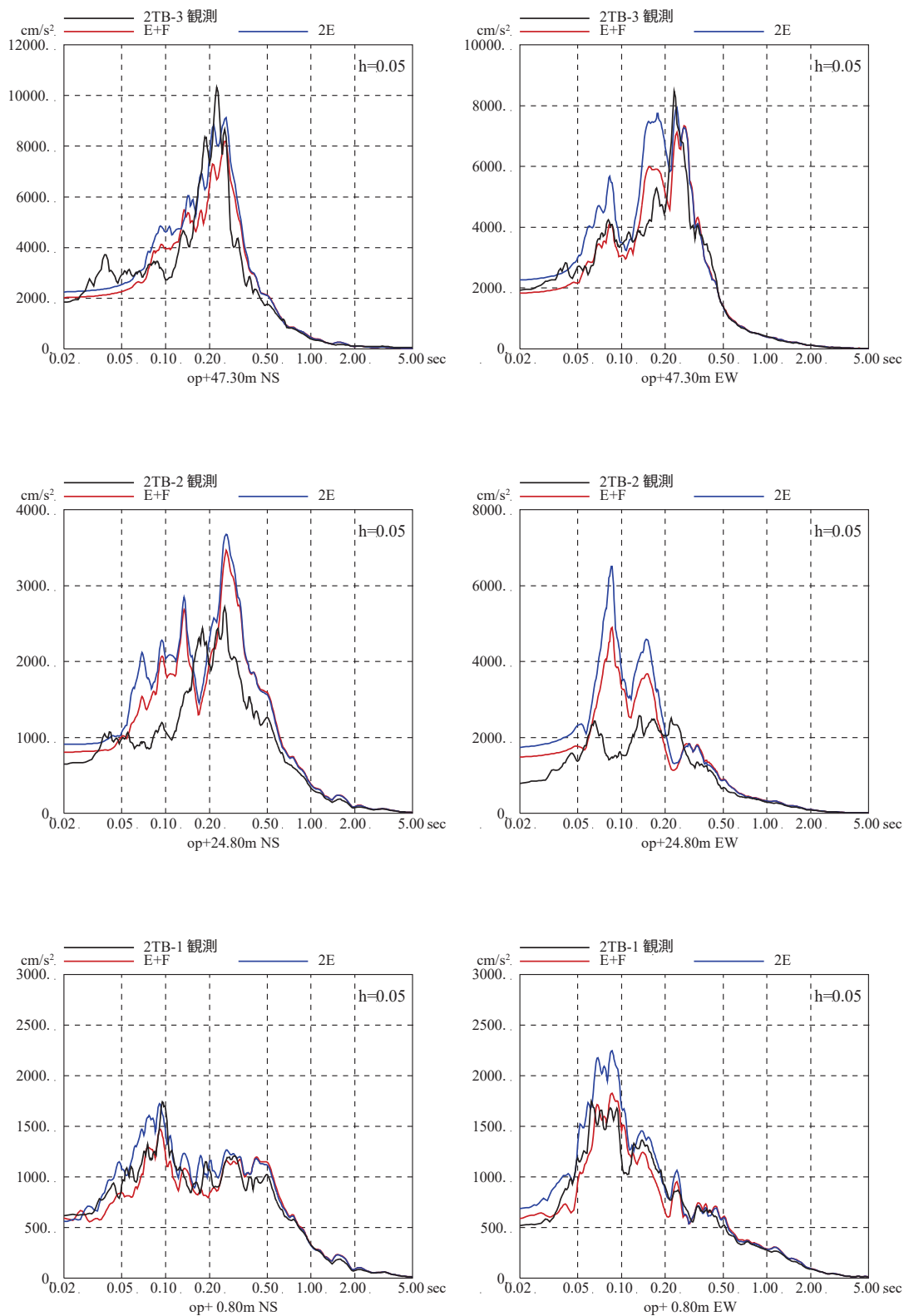


図 5-5 3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析結果の比較  
(タービン建屋)



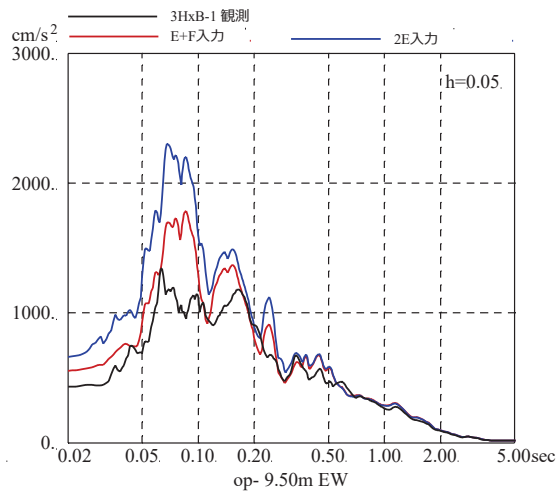
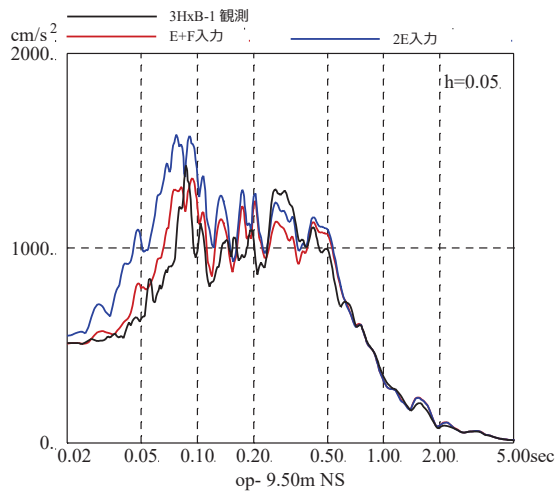
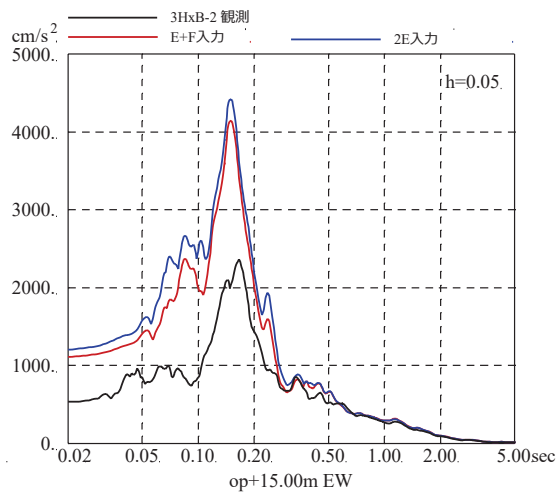
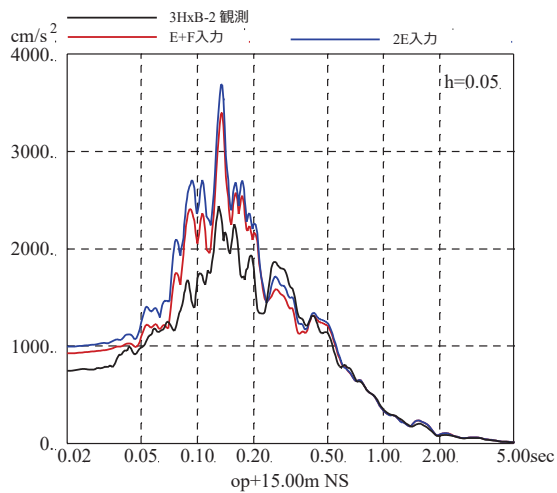


図 5-6 3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析結果の比較  
(第3号機海水熱交換機建屋)

表5-3 今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎版底面 レベル)	周辺地盤と の接地状況	はざとり波を用いた シミュレーション解 析	入力地震動算定におけ る 表層地盤の影響考慮 (E+F 入力)	(参考) 建屋に要求される機能 (2号機用)
原子炉建屋	約 29m (O.P. -14.1m)	3面接地	2E に比べ E+F 入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Sクラス (原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約 16m (O.P. -1.5m)	1~2面接地	-	非考慮 (既工認と同じ)	Sクラス (中央制御室しゃへい 壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約 17m (O.P. -2.2m)	2~3面接地	2E に比べ E+F 入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Bクラス (補助しゃへい壁) Bクラス設備 (Sd 機能維持設備 含む) の間接支持機能 原子炉建屋, 制御建屋へ波及的 影響を与えないこと
補助ボイラー建屋	約 7m (O.P. 8.0m)	2面接地	-	非考慮 (既工認と同じ)	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えな いこと
第3号機 海水熱交換器建屋	約 27m (O.P. -12.5m)	4面接地	2E に比べ E+F 入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	浸水防護施設の間接支持機能
第1号機 制御建屋	約 15m (O.P. 0m)	2面接地	-	非考慮 (既工認と同じ)	制御建屋へ波及的影響を与えな いこと

## 5.2.2 新設建屋

新設建屋は、緊急用電気品建屋及び緊急時対策建屋が対象となる。

建屋の周辺状況から新設建屋はいずれも、建屋規模に対して埋込み深さがある程度深く、かつ、3面が周辺地盤と接していることから、既設建屋での検討結果を踏まえて、今回工認において表層地盤の影響（E+F 入力）を考慮する方針とする。

また、建屋周囲のうち、基礎版レベルまではマンメイドロックを打設すること、また、その周囲は岩盤が分布していることを考慮し、基礎版レベルまでは側面地盤ばねを設定する。

表 5-4 に、既設建屋及び新設建屋を含めた今回工認対象建屋の入力地震動の算定方法及び表層地盤による埋め込み考慮（側面地盤ばねの考慮）の有無の一覧を示す。

表 5-4 今回工認対象建屋の入力地震動の算定方法及び  
表層地盤による埋め込み考慮（側面地盤ばねの考慮）の有無

建屋	埋込み 深さ	周辺地盤との 接地状況	入力地震動算定 における 表層地盤の影響考慮 (E+F 入力)	表層地盤による 埋込み効果の考慮 (側面地盤ばね)	
既設建屋	原子炉建屋	約 29m	3 面接地	考慮 (既工認から変更)	考慮しない
	制御建屋	約 16m	1~2 面接地	非考慮 (既工認と同じ)	考慮しない
	タービン建屋	約 17m	2~3 面接地	考慮 (既工認から変更)	考慮しない
	補助ボイラー建屋	約 7m	2 面接地	非考慮 (既工認と同じ)	考慮しない
	第 3 号機 海水熱交換器建屋	約 27m	4 面接地	考慮 (既工認から変更)	考慮しない
	第 1 号機 制御建屋	約 15m	2 面接地	非考慮 (既工認と同じ)	考慮しない
新設建屋	緊急用電気品建屋	約 10m	3 面接地	考慮	考慮 (基礎版部分のみ)
	緊急時対策建屋	約 17m	3 面接地	考慮	考慮 (基礎版部分のみ)

## 6. まとめ

原子炉建屋の入力地震動算定に用いる地盤モデルを、地盤調査結果及び既往の地震観測記録の分析に基づいて設定した。設定した地盤モデルは、入力地震動の振幅レベルに応じて、表層地盤の非線形特性を考慮できるモデルとした。3.11地震及び4.7地震の自由地盤の観測記録から算定されたはぎとり波に対して、設定した地盤モデルを用いたシミュレーション解析を実施し、解析結果が観測記録及び基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析と整合すること及び地盤物性値の感度を確認したことから、設定した入力地震動評価用地盤モデルは基準地震動  $S_s$  に対する評価に適用できると判断した。

原子炉建屋以外の既設建屋については、建屋の周辺状況等から検討対象建屋を選定の上、3.11地震等によるシミュレーション解析から E+F 効果を確認し、タービン建屋と第3号機海水熱交換器建屋で採用することとした。

新設建屋については、既設建屋での検討結果を踏まえ、建屋の周辺状況等から E+F 入力を採用し、また、基礎版レベルまでは側面地盤ばねを考慮する方針とした。